

A-PDF MERGER DEMO

**RAFAEL CABRAL MELO**

**CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DE SISTEMAS  
DE SECAGEM DE MADEIRA NA INDÚSTRIA  
MOVELEIRA**

**FLORIANÓPOLIS**

**2005**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DE SISTEMAS  
DE SECAGEM DE MADEIRA NA INDÚSTRIA  
MOVELEIRA**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**RAFAEL CABRAL MELO**

Florianópolis, Março de 2005

# **CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DE SISTEMAS DE SECAGEM DE MADEIRA NA INDÚSTRIA MOVELEIRA**

**RAFAEL CABRAL MELO**

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Automação e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

Prof. Julio Elias Normey Rico, Dr  
Orientador

---

Prof. Alexandre Trofino Neto, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Prof. Julio Elias Normey Rico, Dr.  
Presidente

---

Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr.

---

Prof. Nestor Roqueiro, Dr.

---

Prof. Ricardo Antonio Francisco Machado, Dr.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DE SISTEMAS DE SECAGEM DE MADEIRA NA INDÚSTRIA MOVELEIRA**

**RAFAEL CABRAL MELO**

Março/2005

Orientador : Julio Elias Normey Rico, Dr.  
Área de Concentração : Automação e Sistemas.  
Palavras-chave : Controle de Processos, Instrumentação,  
Secagem de Madeira.  
Número de Páginas : 71

Este trabalho apresenta a análise e o projeto de um sistema de controle para um processo de secagem de madeira serrada. O objetivo principal do trabalho é o aumento da produtividade e da qualidade do produto final e a diminuição do consumo de energia. O trabalho propõe uma modificação na estrutura de controle de temperatura utilizada atualmente nas câmaras de secagem. Para alcançar os objetivos desejados foram propostas mudanças na forma de medição e atuação nas variáveis de controle. A análise para validar a nova estrutura de controle foi realizada através da experimentação, completamente em conformidade com as teorias de controle moderno. São apresentados resultados experimentais que demonstram as boas qualidades da nova estrutura proposta que permite que os objetivos traçados sejam atingidos. Também apresenta-se no final do trabalho uma proposta que permitirá em futuros desenvolvimentos aprimorar o sistema hoje projetado

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **CONTROL AND INSTRUMENTATION OF WOOD DRYING SYSTEMS ON FURNITURE INDUSTRY**

**RAFAEL CABRAL MELO**

March/2005

Advisor : Julio Elias Normey Rico, Dr.  
Area of Concentration : Automation e Systems.  
Key words : Process Control, Instrumentation,  
Wood Drying.  
Number of pages : 71

This work presents the analysis and the project of a control system for a process of sawed wooden drying. The main objective of the work is the increase of the productivity and the final product quality and the reduction of the energy consumption. Several modifications had been proposed in the measurement and actuation system and also in the control adjusting. The work suggests a modification in the structure of temperature control, used currently in the drying chambers. To reach the desired objectives proposals of changes in the form of measurement and actuation in the control variables were made. The analyses to validate the new structure of control had been realized through the experimentation, completely in compliance with the theories of modern control. Experimental results that demonstrate the good qualities of the new structure proposal are presented, and it allows the objective tracings are reached.

# Sumário

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Metodologia de Trabalho.....	4
1.4 Organização do Trabalho.....	4
<b>2. Processo de Secagem.....</b>	<b>5</b>
2.1 A Física do Processo.....	6
2.2 Secagem Artificial.....	8
2.3 Fatores que influenciam no processo de secagem.....	12
2.3.1 Inerentes ao material.....	12
2.3.1.1 Teor de umidade.....	12
2.3.1.2 Espessura da madeira.....	13
2.3.2 Inerentes ao ambiente.....	13
2.3.2.1 Temperatura.....	13
2.3.2.2 Umidade relativa.....	14
2.3.2.3 Velocidade do ar.....	14
2.4 Problemas gerados pelo processo de secagem.....	15
2.5 Programas de secagem.....	16
2.6 Descrição da Estufa utilizada.....	20
2.7 Conclusões do capítulo.....	23
<b>3. Instrumentação do processo.....</b>	<b>24</b>
3.1 Sistema de medição.....	24
3.2 Sistema de atuação.....	28
3.3 Sistema de supervisão.....	30

3.3.1 Protocolo Modbus RTU.....	31
3.4 Resultados.....	32
3.5 Conclusões do capítulo.....	33
<b>4. Modelagem do sistema e ajuste do controlador.....</b>	<b>34</b>
4.1 Diagrama de blocos do sistema.....	35
4.2 Análise da faixa de operação do sistema.....	36
4.3 Resposta ao degrau.....	37
4.4 Estimador dos mínimos quadrados não-recursivos.....	40
4.5 Projeto e ajuste do controlador.....	51
4.6 Resultados experimentais.....	59
4.7 Proposta para trabalhos futuros.....	63
4.8 Conclusões do capítulo.....	66
<b>5. Conclusões e perspectivas.....</b>	<b>67</b>

# Lista de Abreviaturas

*UE* : Umidade de equilíbrio.

*PSF* : Ponto de saturação das fibras.

*Tbs* : Temperatura (°C) do termômetro de bulbo seco.

*Tbu* : Temperatura (°C) do termômetro de bulbo úmido.

*Sensor Tbs*: sensor para medir temperatura de bulbo seco.

*Sensor Tbu*: sensor para medir temperatura de bulbo úmido.

*UR* : Umidade relativa do ambiente (%).

*MIMO* : Multiple input multiple output.

*PS* : Potencial de secagem.

*FT* : Função transferência.

*Ta* : Período de amostragem.

*PID* : Proporcional, integral e derivativo.

*PI* : Proporcional e integral.

*IMC* : Internal model control



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

A madeira sempre ocupou lugar de destaque dentre os diversos materiais usados pelo homem. Atualmente, com o desenvolvimento técnico e científico, busca-se cada vez mais conhecer e aprimorar os diversos processos que envolvem a industrialização da madeira, visando melhorar sua utilização e aproveitamento.

Os processos de transformação da madeira visam agregar valor aos produtos obtidos e a secagem é, seguramente, uma das fases que mais influenciam no padrão de qualidade dos produtos florestais. Para JANKOWSKY (1995), a secagem é a etapa da industrialização da madeira que mais agrega valor aos produtos, mas é também uma das fases de maior custo para a indústria madeireira.

Essas são as principais razões pela constante busca de maior eficiência no processo de secagem propriamente dito. A eficiência da secagem está relacionada à qualidade produtiva do sistema, ou seja, redução nos tempos de secagem com qualidade final adequada. Contudo para conseguir eficiência no processo de secagem é necessário considerar o processo de preparação da madeira para a secagem, a qualidade final desejada, a estrutura do secador e o sistema de controle.

O processo de secagem pode ser realizado de forma natural ou artificial. No primeiro caso a secagem é feita ao ar livre. E no segundo são utilizadas câmaras isoladas do ambiente externo, conhecidas como secadores ou estufas.

Os secadores são basicamente câmaras onde a umidade e a temperatura interna são controladas. Estas câmaras são dotadas de dispositivos que proporcionam atuação e medição das variáveis temperatura e umidade do ar simultaneamente. A umidade da madeira também é mensurada juntamente com as variáveis citadas acima.

Os secadores sob estudo são basicamente consumidores de dois tipos de energia, a elétrica e a térmica na forma de vapor. O vapor é utilizado para aquecer o ar no interior dos secadores através de dispositivos trocadores de calor conhecidos como radiadores. Por sua vez a energia elétrica é utilizada em sua quase totalidade com o objetivo de alimentar os ventiladores responsáveis pela circulação do ar aquecido no interior do secador.

No presente caso a energia térmica utilizada possui um custo bastante baixo pelo fato do calor gerado ser conseguido através de refugos de madeira obtidos ao longo do processo produtivo. Este material é introduzido em uma caldeira industrial responsável pela sua queima e geração de vapor para os secadores e outros equipamentos.

Devido ao fato da energia elétrica ser um benefício cada vez mais custoso verifica-se a necessidade do uso racional da energia elétrica. Considerando este fato, busca-se conseqüentemente reduzir o consumo de energia relacionado à secagem de madeira.

Por outro lado encontram-se atualmente no processo de secagem de madeira serrada, largamente utilizado na indústria moveleira, problemas relacionados à qualidade e a produtividade. Um dos fatores que contribui significativamente para essa situação, é a falta de um sistema adequado de controle de temperatura.

Os secadores utilizados como objeto de estudo apresentavam os seguintes problemas operacionais:

- grandes diferenças de temperatura observadas ao longo do comprimento da estufa (em alguns casos mediu-se uma de 20°C entre um extremo e o outro);

- uma grande oscilação da temperatura em torno da referência ou ponto de operação estipulado.

Como conseqüências destes problemas geravam-se principalmente:

- uma secagem pouco homogênea, dado que a variação de temperatura entre os diferentes pontos da estufa levava a que alguns pacotes de madeira saíssem com uma umidade final acima da especificada e outros abaixo da mesma;
- uma secagem pouco eficiente dado que as oscilações de temperatura exigiam um aumento do tempo de secagem.

Por estes problemas no produto final tornava-se necessário realizar um processo de re-secagem, que tem como conseqüência uma redução da produtividade e conseqüentemente do faturamento. Para contornar estes problemas necessitava-se uma modificação no processo de secagem que permitisse superar as dificuldades encontradas e melhorar a eficiência do processo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Melhorar a eficiência dos secadores de madeira aumentando a produtividade e a qualidade da madeira seca e simultaneamente reduzindo a energia consumida.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Modificar a estrutura de medição do processo de secagem para reduzir a variação de temperatura.

- Modelar o sistema com o objetivo de obter um melhor ajuste do controlador e conseqüentemente uma menor variação na variável temperatura.

## 1.3 Metodologia de trabalho

A metodologia apresenta as etapas seguidas na realização deste trabalho para atingir os objetivos desejados.

1. Estudo do sistema de secagem. Esta etapa engloba o estudo do processo e do sistema de instrumentação e controle.
2. Identificação dos problemas e suas causas.
3. Propostas de melhorias.
4. Testes.
5. Implementação.

## 1.4 Organização do trabalho

Este documento está organizado como segue. No próximo capítulo apresenta-se o processo de secagem. O capítulo 3 descreve o sistema de instrumentação do processo. No capítulo 4 apresenta-se a modelagem do sistema e o ajuste do controlador, juntamente com os resultados experimentais e uma proposta para futuros trabalhos. E no quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões e perspectivas para este trabalho.

# Capítulo 2

## Processo de secagem

A secagem da madeira pode ser definida como o processo que tem como objetivo atingir um teor de umidade pré-determinado para a madeira, com o mínimo de defeitos, no menor tempo possível e de uma forma economicamente viável para o uso a que se destina (MARTINS, 1988).

O processo tem como objetivo primordial garantir que a madeira esteja em condições adequadas para posterior processamento. O emprego da madeira com teores de umidade compatíveis com as condições ambientais de uso, obtidos através de adequados procedimentos de secagem, reduz as indesejáveis variações dimensionais (MILLS, 1991).

A madeira é um material higroscópico, isto é, tem afinidade e capacidade de absorver vapor d'água da atmosfera. Deste modo, se uma peça de madeira bastante seca é colocada em uma atmosfera de elevada umidade relativa, a madeira tenderá a absorver umidade até atingir um ponto de equilíbrio; por outro lado uma madeira úmida colocada em uma atmosfera de baixa umidade relativa perderá umidade até atingir o equilíbrio com o ambiente (PONCE & WATAI, 1985).

A umidade ótima da madeira é função da umidade relativa do ar e da temperatura na qual será utilizada. Por exemplo, a umidade adequada da madeira a ser convertida em móvel deve ser a umidade de equilíbrio com as condições ambientais de uso. De nada adianta secar uma madeira até atingir a umidade correspondente à que terá em uso e, após a secagem, permitir novamente a absorção de água durante o processo de produção e armazenagem (PONCE & WATAI, 1985).

A tabela 2.1 indica os teores de umidades finais da madeira para certos usos ou produtos.

Produtos	Umidade da Madeira (%)
Madeira para construção externa	12-18
Painéis (compensados, aglomerados, laminado etc.)	6-8
Móveis para interiores	6-10
Móveis para exteriores	12-16
Embalagens (caixas)	12-16
Pisos	6-11

Tabela 2.1. Teores de umidades finais recomendados para certos produtos de madeira.

## 2.1 A física do processo

Do ponto de vista físico, a secagem de madeira pode ser definida como um equilíbrio entre a transferência de calor da corrente de ar para a madeira, a evaporação superficial na madeira, a difusão de umidade através da madeira e o fluxo de massa da água capilar (HART, 1965).

A superfície da madeira é aquecida através da convecção térmica do ar. Após aquecida a superfície, o calor se propaga para o interior da madeira por condução. No início da secagem, quando a madeira está úmida, a transferência de calor do ambiente para a superfície é o fator mais importante. A medida que a madeira perde umidade, a transferência de calor da superfície para o interior passa a ser o fator limitante para a secagem. É por esta razão que altas velocidades de ar são mais importantes nas primeiras fases de secagem do que nas fases finais.

A transferência de calor e a evaporação superficial são controladas pelas condições externas, já o movimento da umidade do interior até a superfície da madeira é controlada principalmente por propriedades como a sua permeabilidade e a massa específica (GALVÃO & JANKOWSKY, 1985).

Quando se alteram as condições de temperatura e umidade relativa do meio, o conteúdo de umidade da madeira vai sendo alterado devido a uma propriedade denominada de higroscopicidade, ou seja, a capacidade que a madeira tem de trocar água com o meio dependendo das condições ambientais.

Sabe-se que as variações das condições ambientais afetam a umidade de equilíbrio (UE) da madeira. Este ponto é onde a madeira praticamente cessa a troca de água com o meio, ou seja, a umidade da madeira tende a atingir um teor onde ocorre o equilíbrio dinâmico com a umidade do ambiente onde se encontra. A umidade de equilíbrio é afetada por fatores intrínsecos da madeira, dentre eles a constituição química, a estrutura anatômica, e pela história de sua exposição às condições ambientais.

Quando uma árvore recém abatida é exposta ao meio, inicialmente evapora-se a água localizada nos canais de transporte, no lúmen e espaços intracelulares. Esta água é denominada de água livre ou de capilaridade. Permanece na madeira toda a água localizada no interior das paredes celulares dos tecidos, que é denominada de água adsorvida, de adesão ou higroscópica. A umidade correspondente a este estado é chamada de ponto de saturação das fibras (PSF).

Quando a umidade da madeira encontra-se abaixo do ponto de saturação das fibras é que ocorre a variação dimensional, expandindo-se ou contraindo-se. Dependendo da intensidade da movimentação da peça, que também varia com o diferencial de secagem ou umedecimento e com a espécie em questão, o objeto produzido com esta madeira poderá apresentar defeitos extremamente graves, como empenamentos, rachaduras, além dos já mencionados encolhimentos e dilatações. Por isso, é desejável que a secagem seja efetuada o mais próximo possível de sua UE adequada.

## 2.2 Secagem artificial

A secagem artificial é aquela conduzida em estufas ou secadores, onde se tem total controle da circulação do ar, da temperatura e da umidade relativa. Segundo STCP (1990), este é o processo de maior aplicação na indústria madeireira. De acordo PRATT (1974), os secadores podem ser definidos como câmaras de secagem que operam com temperaturas entre 40° e 90°C.

Nem todas as estufas para secagem de madeira são iguais, a diferença está no projeto e na qualidade dos materiais utilizados na construção. Cada uma tem que ser desenhada de acordo com o tipo de madeira, volume de produção mensal, comprimentos das peças, entre outras variáveis.

Normalmente as estufas possuem um sistema de aquecimento através de trocadores de calor, um sistema de ventilação para forçar o fluxo de ar através da pilha de madeira, um sistema de umidificação do ar e janelas que permitam a exaustão do ar saturado em umidade e admissão de ar externo (não saturado).

O tipo de material usado na construção do secador irá determinar a durabilidade do equipamento e o isolamento térmico. O ambiente de secagem é bastante agressivo, pois o ar está aquecido, úmido e pode conter extrativos retirados da madeira, o que aumenta a incidência da corrosão. Quanto melhor o isolamento térmico, menores serão as perdas de calor por radiação e menor o consumo de vapor. Tão importante quanto a velocidade de circulação do ar é a distribuição do fluxo de ar através das pilhas de madeira. Considera-se que velocidades do ar entre 2 m/s e 4 m/s são adequadas para a maioria das espécies de madeira (HILDEBRAND, 1970), contudo madeiras permeáveis ou com elevado teor de umidade inicial podem requerer velocidades acima de 4 m/s para uma secagem rápida. Mesmo operando com velocidades adequadas, se o fluxo não for uniforme em toda a seção transversal do secador, parte da carga secará mais rapidamente e prejudicará o tempo de secagem ou a qualidade da madeira. Adicionalmente, é importante destacar, conforme



(HILDEBRAND, 1970), que o projeto aerodinâmico do ventilador determina a relação entre potência necessária para o motor elétrico, vazão e pressão do ar.

No processo de secagem, o sistema de aquecimento mais comum é uma bateria de trocadores de calor que pode utilizar como fluido térmico o ar quente, água quente, vapor d'água ou óleo térmico. A umidificação do ar é obtida pela liberação de vapor de baixa pressão ou com a aspersão de água fria dentro do secador. A circulação do ar é promovida por um conjunto de ventiladores, posicionados lateralmente em relação a madeira ou sobre o falso teto acima das pilhas. Os “dampers” ou janelas são colocados de tal forma que a ação dos ventiladores faz com que o ar quente e úmido do interior do secador seja expelido, admitindo ar do meio externo (JANKOWSKY, 1995). A secagem artificial apresenta como principais vantagens a independência das condições climáticas, menor duração em relação à secagem ao ar livre, maior controle sobre os defeitos e umidade final, adequação a todo tipo de madeira e ampla possibilidade de experimentação de diferentes condições climáticas.

Do ponto de vista do controle o processo de secagem sofre influências do material madeira, das variáveis do processo em si, ou seja, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, e também da prévia preparação da madeira.

Para a medição de umidade relativa do ar é utilizado o psicrômetro. Conforme (GALVÃO & JANKOWSKY, 1985) este dispositivo é composto, na maioria dos casos, por dois sensores de temperatura do tipo PT100, sendo que um deles mede a temperatura de bulbo seco (Tbs) e outro mede a temperatura de bulbo úmido (Tbu). O termômetro de bulbo seco é responsável pela medição da temperatura do ar interno do secador. Já o termômetro de bulbo úmido, tem seu bulbo envolto por um tecido umedecido. A evaporação da água retira energia do bulbo úmido, acarretando abaixamento da temperatura registrada pelo termômetro. Quando a temperatura estabiliza-se, tem-se a temperatura de bulbo úmido. Normalmente para medir a umidade relativa, provoca-se um fluxo de ar no bulbo úmido para acelerar a evaporação que é proporcional a umidade relativa (UR) do ambiente.

Caso o ar esteja saturado, os dois termômetros registrarão a mesma temperatura. Quanto mais seco o ar, maior a diferença de temperatura entre os dois termômetros.

Para a medição da umidade da madeira são utilizados medidores elétricos. O teor de umidade da madeira está relacionado com o peso de água no interior do material como percentagem do peso da madeira seca. A madeira quando seca é um excelente isolante elétrico, porém quando a umidade da madeira aumenta, essa característica diminui fazendo com que esta passe a conduzir a corrente elétrica. Os medidores elétricos de resistência funcionam a partir da verificação das propriedades elétricas da madeira. Em 1931, SUITS & DUNLAP realizaram os primeiros estudos referentes à obtenção das relações entre a resistência elétrica e o teor de umidade da madeira. A resistência elétrica pode ser definida como sendo a propriedade que um material possui em resistir a passagem da corrente elétrica. As características da variação da resistência elétrica da madeira com a umidade são reveladas pela figura 2.1, que mostra, também, a influência da temperatura no fenômeno, indicando a necessidade de correções para temperaturas diferentes daquela para a qual o medidor foi calibrado.

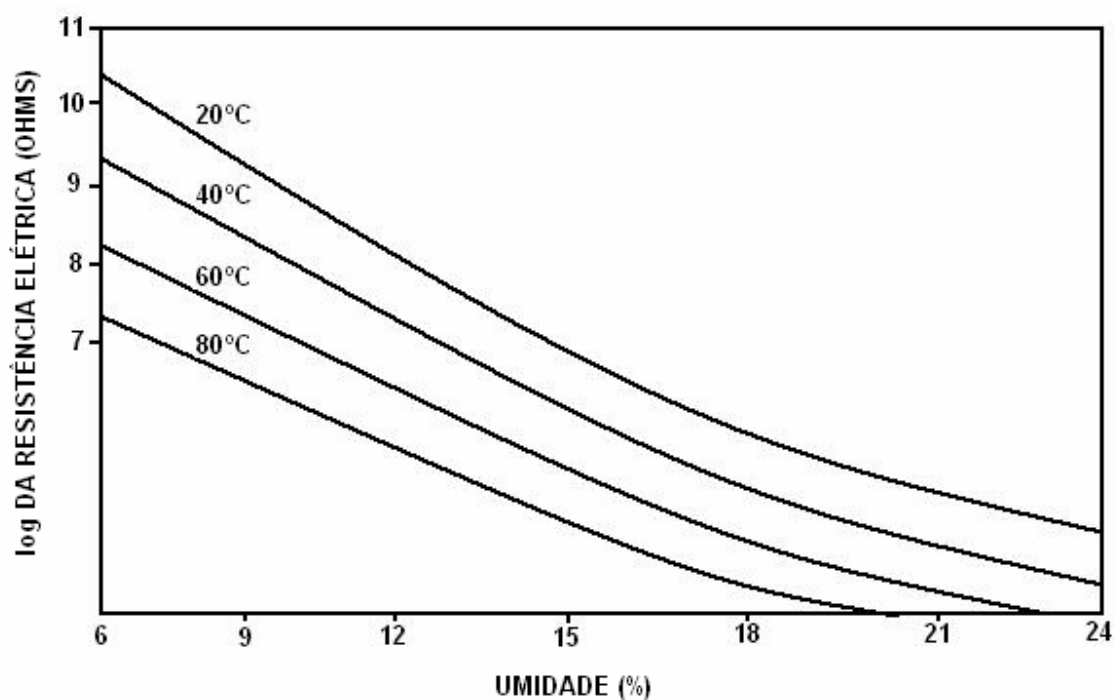


Figura 2.1. Variação da resistência elétrica em função do teor de umidade e da temperatura.

Os medidores resistivos possuem uma maior acuracidade entre 6% e 30% de umidade da madeira, porque quando a madeira está abaixo de 6% a resistividade é muito alta para ser medida com medidores de umidade comerciais comuns, e quando a madeira está mais úmida do que 30%, as alterações de resistividade são muito pequenas para permitir medições precisas (SKAAR, 1972), como mostra a figura 2.2. Porém, nos controladores modernos, são utilizadas curvas de correção em função da temperatura para permitir uma maior precisão e linearidade na medição de umidade da madeira acima do PSF.

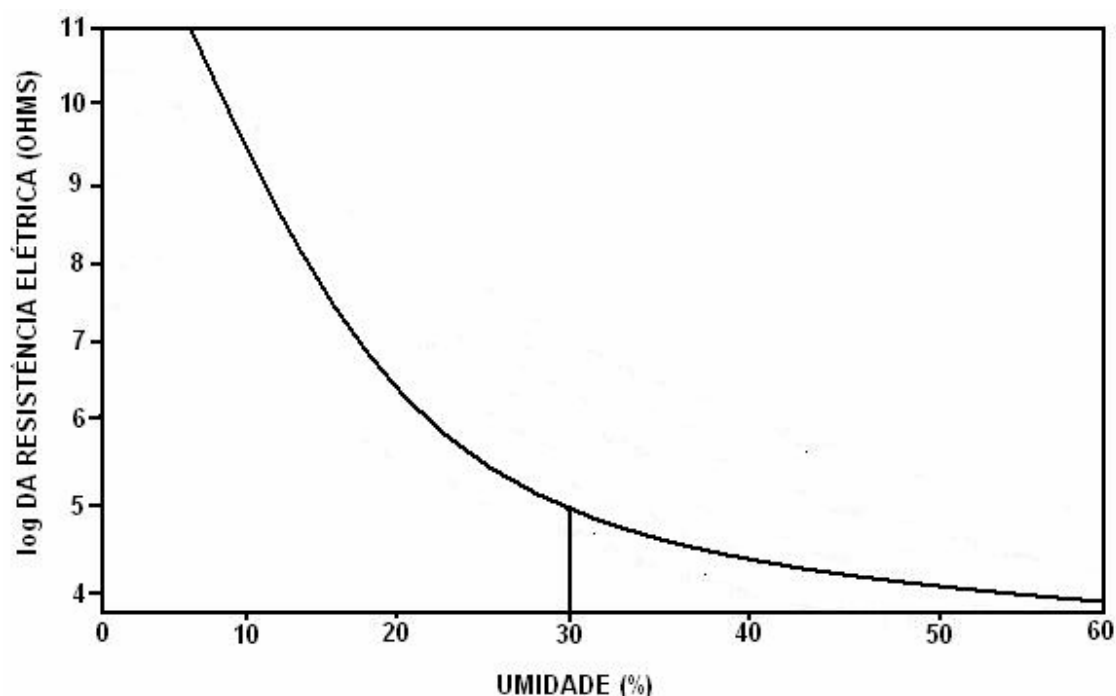


Figura 2.2. Resistência da madeira em função do teor de umidade, acima e abaixo do PSF.

Na prática, pinos sensores são utilizados para a medição da umidade da madeira. Estes sensores são distribuídos estrategicamente na pilha de madeira, aos pares, procurando cobrir a variação de umidades presente na carga.

A espessura e a distância entre os pinos sensores, não têm influência qualquer nas medições do teor de umidade, tendo estas variáveis somente a função de melhor ajuste no momento de cravar os pinos na madeira. Em contrapartida, o comprimento dos pinos e conseqüentemente a profundidade de penetração que estes podem alcançar, influenciam os

valores obtidos do teor de umidade da madeira, pois, medidores elétricos não oferecem leituras do gradiente de umidade ao longo dos eletrodos e sim o teor de umidade no ponto de medição (KATS & MILLER, 1963; JAMES, 1975).

A secagem de madeira é dividida em etapas. A primeira etapa é conhecida como fase de aquecimento onde através de uma referência em rampa a temperatura da câmara é elevada até o valor de regime. As fases intermediárias são etapas onde é propositalmente variada a umidade de equilíbrio buscando uma aceleração na secagem. As fases finais são destinadas ao condicionamento, uniformização da umidade da carga e ao resfriamento da câmara para posterior descarregamento. Maiores detalhes relacionados aos programas de secagem serão apresentados na sessão 2.5.

## **2.3 Fatores que influenciam no processo de secagem**

O processo de secagem é influenciado por vários fatores, alguns dependentes do material e outros do ambiente. Dado um determinado tipo de madeira, temos abaixo alguns dos principais fatores que influenciam o processo de secagem.

### **2.3.1 Inerentes ao material**

#### **2.3.1.1 Teor de umidade**

Segundo KOLLMANN & CÔTÉ (1968), normalmente o tempo de secagem é influenciado pela diferença entre a umidade inicial e final da madeira, onde quanto maior esta diferença maior será o tempo de secagem. HART (1996) afirma que o tempo total de

secagem aumenta com o aumento do teor de umidade inicial tanto para madeiras altamente permeáveis, quanto para madeiras altamente impermeáveis.

### 2.3.1.2 Espessura da madeira

A taxa de difusão da água no interior da madeira é proporcional ao gradiente de pressão de vapor, e como o gradiente é inversamente proporcional a espessura da madeira, a taxa de difusão também o é (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968). Evidentemente, o tempo de secagem de um material espesso é maior do que de um material com menor espessura. Uma aproximação teórica sugere que o tempo sob condições de secagem semelhantes, é uma fusão de espessura ao quadrado, sendo que o efeito da espessura é levemente menor no caso de secagem em estufa. Deste modo, o tempo de uma peça de 50mm de espessura é 3 a 4 vezes maior do que uma peça de 25mm (MACMILLEN & WENGERT, 1978).

## 2.3.2 Inerentes ao ambiente

### 2.3.2.1 Temperatura

O calor é a fonte da qual as moléculas de água na madeira adquirem a energia cinética para provocar a evaporação. A temperatura também influencia a umidade relativa do ar, aumentando a pressão de saturação do vapor de água, ou seja, aumentando a capacidade do ar em receber água evaporada da madeira (HILDEBRAND, 1970).

A secagem se processa do interior para a superfície, se a temperatura for constante, a taxa de evaporação diminuirá gradualmente à medida que diminui o teor de umidade da madeira e aumenta a pressão de vapor do ar. Por esta razão, para manter a taxa de secagem constante, deve-se aumentar progressivamente a temperatura para fornecer a energia

adicional às moléculas de água ou reduzir a umidade relativa da estufa (menor pressão de vapor) (KLITZKE, 2002).

#### 2.3.2.2 Umidade relativa

Com o aumento da temperatura sem adição de umidade, ocorre uma diminuição da umidade relativa do ar porque aumenta a capacidade do ar em reter umidade. Entre a umidade relativa do ar e a temperatura, se estabelece um equilíbrio higroscópico de grande importância para a secagem da madeira, uma vez que através desta relação pode-se controlar e regular o processo de secagem (KLITZKE, 2002). Aumentando-se a temperatura do ar numa câmara de secagem, a umidade de equilíbrio é reduzida, obtendo-se com isso uma redução no teor de umidade da madeira. Para que a umidade relativa do ar seja mantida constante durante o processo de secagem, é preciso haver uma troca de ar úmido do ambiente da secagem por ar fresco (HILDEBRAND, 1964).

#### 2.3.2.3 Velocidade do ar

O fluxo de ar através da pilha de madeira tem duas funções básicas: transferir o calor produzido pelo sistema de aquecimento para a superfície da madeira e transportar a massa de vapor d'água desta superfície para a atmosfera (HILDEBRAND, 1964). O efeito da circulação do ar na taxa de transferência de calor é mais pronunciado acima do PSF e diminui progressivamente à medida que o teor de umidade da madeira decresce abaixo deste ponto (KLITZKE, 2002).

De acordo com FRICKE (1968), o uso de altas velocidades de ar é vantajoso para madeiras finas, com elevado teor de umidade inicial e de fácil secagem, pilhas largas, e quando se deseja uniformidade de secagem. Em contrapartida, baixas velocidades são mais adequadas para madeiras espessas, parcialmente secas e pilhas estreitas. O aumento do ar reduz o gradiente de temperatura entre pilhas de madeira, resultando numa secagem mais rápida e homogênea. Outra consequência, é que mais calor será adicionado ao sistema

devido a rapidez de troca térmica o que tende a diminuir o gradiente de temperatura através da pilha, aumentando a taxa de secagem (FRICKE, 1968).

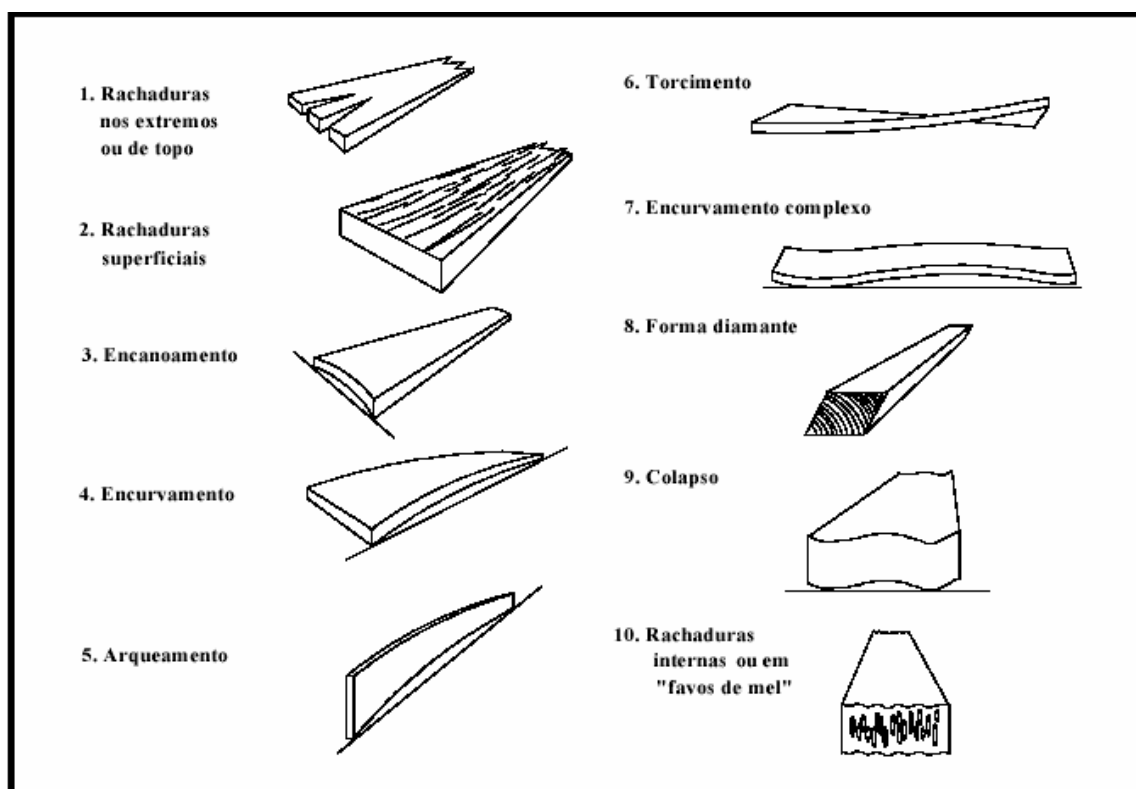
## **2.4 Problemas gerados pelo processo de secagem**

Os defeitos que ocorrem na madeira durante a secagem causam significativos prejuízos para quem seca madeira e desestimula a utilização de determinadas espécies susceptíveis a esses defeitos; contribuindo para a exploração seletiva, responsável pelo reduzido número de espécies atualmente comercializadas (MARTINS,1988).

Os principais defeitos, mostrados na figura 2.3, gerados durante o processo de secagem são os empenos, as rachaduras, o colapso e o endurecimento superficial. Todos estes problemas devem-se aos efeitos produzidos pela variação da temperatura e da umidade no interior da câmara de secagem.

Para minimizar o surgimento destes defeitos deve-se manter a temperatura e umidade o mais próximo possível das condições ideais, sendo que estas condições variam para cada tipo de madeira.

Assim, o projeto do sistema de controle adequado é de extrema importância afim de garantir que as variáveis sob controle permaneçam dentro de faixas seguras para a operação.

Figura 2.3 – Defeitos de secagem (MENDES *et al.*, 1998)

## 2.5 Programas de secagem

Segundo ANDRADE (2000) a escolha do programa de secagem é um fator determinante para que a secagem ocorra de maneira adequada. Um programa de secagem consiste num plano para se aplicar à combinação adequada de temperatura e umidade relativa à carga de madeira na estufa, visando reduzir a umidade da madeira até um teor pré-determinado, com o mínimo de defeitos (MARTINS, 1988 e GALVÃO & JANKOWSKY, 1985). De acordo com STCP (1990), cada espécie apresenta um melhor comportamento a uma determinada temperatura e umidade relativa. Em termos gerais, pode-se afirmar que a temperatura deve ser baixa e a umidade relativa alta para materiais que são mais propensos a apresentar defeitos.



Os principais fatores envolvidos na escolha de um programa de secagem são: espécie de madeira (massa específica, permeabilidade, contração, etc); umidade inicial e final; espessura do material; uso a que se destina; e equipamento de secagem (MARTINS, 1988).

Os programas do tipo umidade-temperatura são os mais comuns na secagem artificial. Neste tipo de programa, a temperatura do ar no interior do secador (e conseqüentemente a umidade relativa também) é ajustada em função do teor de umidade da madeira (HILDEBRAND, 1970; PRATT, 1974; GALVÃO & JANKOWSKY, 1985; dentre outros). Neste caso os valores de referência para bulbo seco e bulbo úmido são mantidos constantes até que a madeira alcance uma determinada umidade.

Um outro conceito importante dentro da secagem de madeira é o potencial de secagem (PS). Potencial de secagem ou gradiente de secagem, é a relação existente entre o teor de umidade médio da madeira e o teor de umidade de equilíbrio correspondente às condições do secador, em um determinado momento. Quanto maior é o PS, mais agressiva é a secagem e conseqüentemente mais sujeita ao aparecimento de defeitos. O gradiente de secagem pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$PS = \frac{TUm}{TUE}$$

PS = Potencial de secagem

TUm = Teor de umidade médio da madeira (%)

TUE = Teor de umidade de equilíbrio da madeira (%)

No programa de secagem podem ser reconhecidas três fases distintas.

**Aquecimento:** a madeira é aquecida sem iniciar o processo de secagem propriamente dito. Inicialmente, o ar do interior do secador é aquecido até atingir a temperatura de bulbo seco desejada. A queda na umidade relativa é então compensada com intensa umidificação. Posteriormente, promove-se o equilíbrio térmico entre o ar e a madeira. Como nesta fase é indesejável que a madeira inicie o processo de secagem, utilizam-se umidades relativas elevadas.

**Secagem propriamente dita:** onde ocorre a retirada de umidade da madeira. Inicialmente, há a remoção da água capilar, onde devem ser utilizadas baixas temperaturas e altas umidades relativas, para prevenir a ocorrência de colapso e rachaduras. A umidade relativa inicial dependerá da espécie em secagem. A temperatura inicial deve ser mantida até que a água capilar da madeira seja removida. Os valores máximos dependem da espécie e da espessura da madeira: para maiores espessuras adotam-se temperaturas mais baixas. A retirada da água higroscópica caracteriza-se pela elevação da temperatura com a redução simultânea da umidade relativa. O período de tempo a ser despendido com a remoção da água higroscópica irá variar com a massa específica das espécies, espessura das peças, temperatura utilizada e gradiente de umidade.

**Uniformização e condicionamento:** são fases necessárias quando se pretende homogeneizar o máximo possível à umidade em todas as peças da pilha e eliminar suas tensões internas, mediante o reumedecimento das camadas superficiais. As tensões internas são eliminadas, de acordo com STCP (1990), pela redução do gradiente de umidade (a diferença de umidade entre o centro e a superfície).

A seguir pode-se observar uma tabela (Tabela 2.2) onde consta um exemplo de programa de secagem. As fases de uniformização e condicionamento não são mostradas, pois dependem da umidade final desejada.

PROGRAMA A (mudanças suaves)						PROGRAMA B (mudanças bruscas)					
Umid. da mad (%)	Ts (°C)	Tu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS	Umid. da mad (%)	Ts (°C)	Tu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquec.	40,0	39,0	94	21,6	-	Até 60	40,0	37,5	85	17,1	-
até 50	40,0	39,0	94	21,6	-	60	40,0	36,5	80	15,0	-
50	40,0	39,0	94	21,6	2,31	40	45,0	40,5	75	13,5	2,96
40	40,0	38,5	91	19,8	2,02	35	45,0	39,5	70	12,2	2,87
35	40,0	37,5	85	17,0	2,06	30	45,0	43,5	65	11,1	2,70
30	40,0	36,5	80	15,1	1,99	25	50,0	42,0	60	9,9	2,53
28	42,0	38,0	77	14,0	2,00	20	60,0	47,5	50	7,3	2,74
26	45,0	40,0	73	12,8	2,03	15	65,0	48,5	40	6,0	2,50
24	48,0	42,5	71	11,9	2,02						
22	51,0	44,5	67	11,0	2,00						
20	54,0	46,5	64	10,0	2,00						
18	57,0	48,0	58	8,8	2,05						
16	60,0	49,5	55	8,1	1,98						
14	60,0	47,0	47	6,9	2,03						
12	60,0	45,0	41	6,1	1,97						
10	60,0	41,0	31	4,9	2,05						
8	60,0	37,0	23	4,0	2,00						

Programa A → proposto por Xylema<sup>5</sup>  
Programa B → proposto por Pratt (1974)

Ts = Temperatura de bulbo seco  
Tu = Temperatura de bulbo úmido  
UR = Umidade relativa do ar  
UE = Umidade de equilíbrio  
PS = Potencial de secagem

Tabela 2.2. Programas de secagem para madeira de Jatobá com até 38 mm de espessura (ANDRADE, 2000).

Nota-se que o programa A (Tabela 2.2) opera com mudanças suaves ou contínuas das condições de secagem, mantendo o potencial de secagem aproximadamente constante; enquanto o programa B trabalha com mudanças mais bruscas e redução do potencial de secagem.

Segundo DENIG (1994), as mudanças bruscas de temperatura e umidade de equilíbrio podem favorecer a ocorrência de defeitos. Um exemplo é a ocorrência e rachaduras superficiais quando as amostras chegarem próximas do PSF, onde acontece uma mudança muito drástica nas condições de secagem. Por outro lado, as mudanças suaves nas condições de secagem mantém a velocidade e o potencial de secagem aproximadamente constantes, diminuindo a probabilidade de ocorrência de defeitos.

## 2.6 Descrição do funcionamento da estufa utilizada

A estrutura física da estufa utilizada para a realização deste trabalho assemelha-se com a mostrada na figura 2.4.

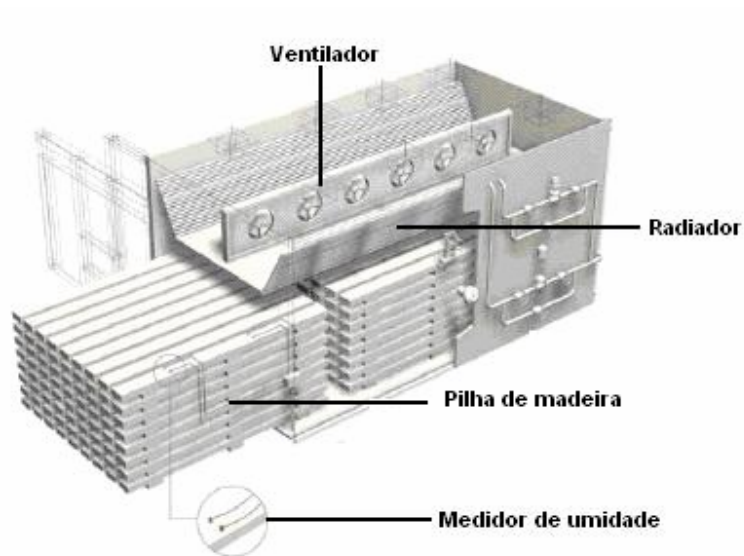


Figura 2.4 Estufa para secagem de madeira.

Na figura 2.4 nota-se que na parte superior da estufa estão localizados os ventiladores, posicionados na vertical e os radiadores colocados na horizontal. E em destaque é possível observar os pinos medidores de umidade fixados na madeira. A madeira entra na estufa armazenada em pilhas (pacotes), conforme figura 2.5.

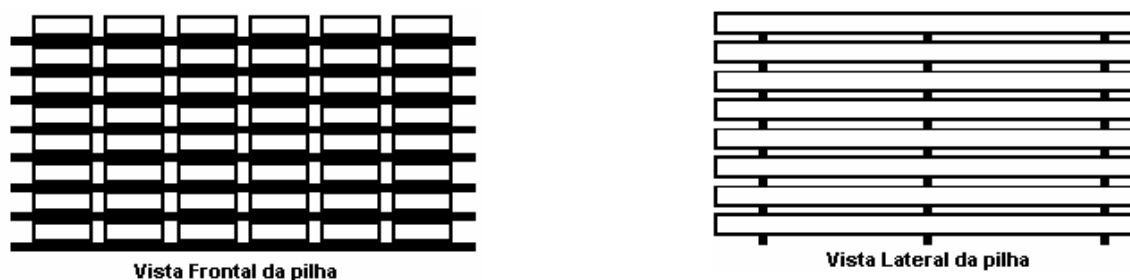


Figura 2.5. Detalhe das pilhas de madeira.

É possível observar na figura 2.5 que entre um sarrafo de madeira e outro existe um espaço. Este espaço é que permite que o ar circule por dentro do pacote alcançando todos os sarrafos dentro da pilha de madeira.

No caso sob estudo, o pacote de madeira é colocado em cima de um vagonete através de empilhadeiras e após este procedimento são fixados os pinos sensores de umidade. O carregamento da estufa é feito pela parte frontal movimentando o vagonete para dentro do secador através de um guincho. Terminado o carregamento da estufa inicia-se o processo de secagem.

Na figura 2.6 podem ser vistos, de forma esquemática: os radiadores os ventiladores, os dampers e os aspersores.

O ar aquecido pelos radiadores, cuja temperatura é determinada pelo programa de secagem, é forçado a circular no interior da estufa através dos ventiladores (conforme indicação das setas de circulação do ar). Este ar conseqüentemente também circula pelo interior da pilha de madeira aquecendo-a e retirando a água depositada sobre sua superfície. Neste caso, como a largura da pilha de madeira é superior a 2,4m, é necessária a reversão no sentido da ventilação em intervalos de tempo pré-definidos (ARGANBRIGHTS, 1979). No princípio a circulação do ar é feita no sentido horário e no intervalo de tempo seguinte o ar circula no sentido anti-horário, ou vice-versa. A velocidade da ventilação no interior da estufa pode variar de acordo com a fase de secagem. No início da secagem, quando se retira maior quantidade de água da madeira, é necessária uma velocidade mais elevada. A medida que a madeira vai secando, velocidades elevadas deixam de ser importantes e pode-se então trabalhar com velocidades menores, economizando-se energia elétrica. Lembrando

que a variação da velocidade de ventilação é possível com o uso de inversores de frequência acoplados aos ventiladores.

A velocidade por fase é determinada pelo programa de secagem, porém seu controle é feito em malha aberta.

Os dampers com a função de reduzir a umidade interna através da troca de ar, apresentam-se na parte superior da Figura 2.6, e também são controlados conforme o programa de secagem. Os aspersores, responsáveis pela umidificação do ar e da madeira, também podem ser observados na figura 2.6 e são utilizados em fases pré-definidas pelo programa de secagem. Seu acionamento é feito de forma pulsátil, onde o tempo em que permanece aberto ou fechado é pré-determinado.

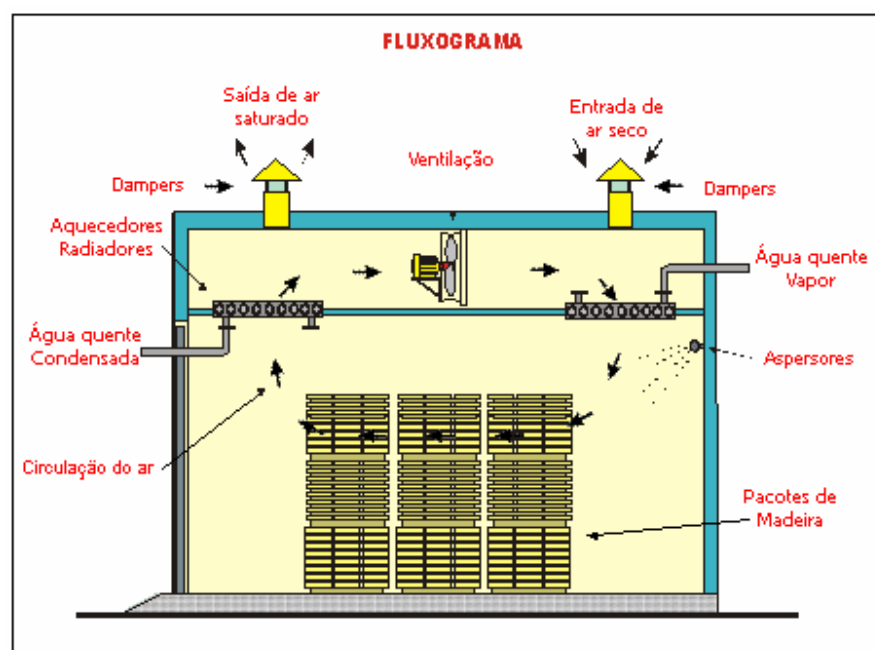


Figura 2.6. Funcionamento da estufa.

## 2.7 Conclusões do capítulo

Neste capítulo apresentou-se o processo de secagem e suas principais características. Mostraram-se também os principais fatores que influenciam no processo e os principais defeitos que ocorrem dentro da secagem.

Da explicação do funcionamento do processo resulta claro que a execução de um adequado “programa de secagem” garante a qualidade final da madeira seca. Para que este programa seja realmente executado é necessário que o sistema de instrumentação, controle e atuação esteja adequadamente projetado e ajustado. Quando isto não ocorre diversos problemas podem ser detectados. Assim, no próximo capítulo se apresenta o problema da diferença de temperatura encontrada ao longo do comprimento do secador, se propõem soluções e se apresentam os resultados experimentais obtidos .

# Capítulo 3

## Instrumentação do processo

Neste capítulo descreve-se o estudo do sistema de instrumentação do processo original, apresentando os problemas encontrados e as melhorias propostas.

### 3.1 Sistema de medição

A estrutura original do sistema apresentava uma única válvula de controle do tipo ON-OFF para o acionamento do aquecedor e dois sensores posicionados nas extremidades do secador, conforme figura 3.1.

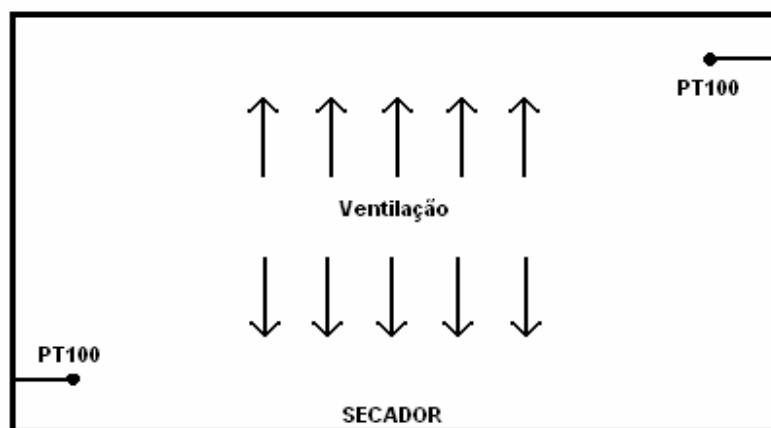


Figura 3.1. Estrutura do sistema de medição do sistema original.



Para verificar a eficiência do sistema de medição foram realizados testes posisiconando dois sensores de bulbo seco Tbs, um em cada extremo do secador, com o objetivo de medir a diferença de temperatura observada ao londo de seu comprimento. Um sensor de temperatura chamado Tbs\_1 foi posicionado em um extremo do secador e Tbs\_2 foi posicionado no extremo oposto e através de medições realizadas observaram-se diferenças de temperatura de 20°C.

A tabela 3.1 apresenta valores médios de diferenças de temperatura observados em diferentes pontos de operação.

Referência °C	Tbs_1 °C	Tbs_2 °C	$\Delta T$ °C
80	80	100	20
85	84	102	18
85	83	99	16
85	86	98	12
90	92	100	8

Tabela 3.1: Mostra a diferença de temperatura do sistema original para diferentes valores de referência.

Pode-se observar na tabela 3.1, grandes diferenças de temperatura entre os extremos do secador. Estas diferenças são provocadas pelo fato dos radiadores ou trocadores de calor possuírem rendimentos diferentes entre si e ainda pela distribuição de calor interna e ventilação não serem uniformes. E como consequência disto tem-se um aquecimento desuniforme. Este era o primeiro problema a ser solucionado.

Após pesquisas, novas medições e visitas a outros secadores semelhantes, decidiu-se realizar um teste modificando a estrutura de atuação e medição. Para reduzir os efeitos da distribuição desuniforme de calor resolveu-se separar o problema em dois menores, ou seja, dividiu-se a estufa em duas partes. Para isso, promoveu-se um reposicionamento dos

sensores existente e adicionou-se dois novos. Então dois sensores de temperatura de bulbo seco Tbs, do tipo PT100, foram adicionados ao longo do comprimento do secador. Os sensores foram posicionados a 3 metros das extremidades, ficando 6 metros distantes entre si (Figura 3.2).

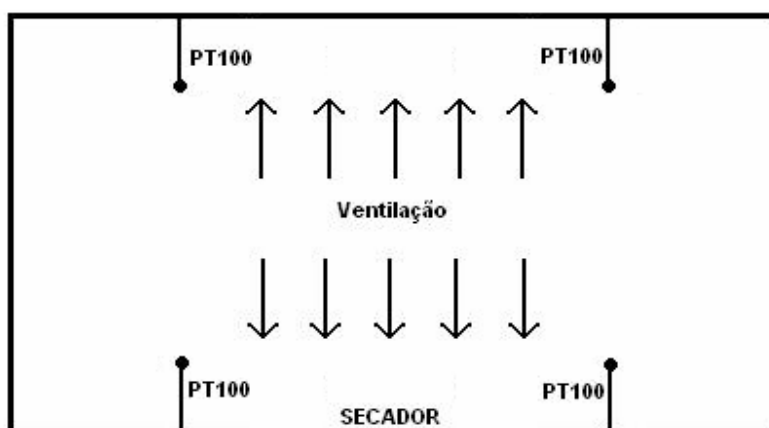


Figura 3.2.Estrutura do sistema de medição do sistema modificado.

Os sensores são utilizados de forma alternada pelo sistema de controle, assim como no sistema original, dependendo do sentido da ventilação. Caso a ventilação esteja atuando para o lado esquerdo (figura 3.3), os sensores utilizados pelo sistema de controle serão os deste lado, caso contrário (figura 3.4) usam-se os medidores do lado direito do secador.

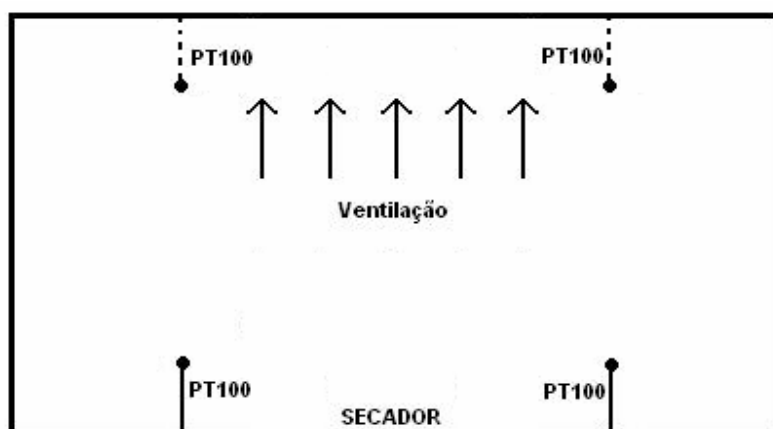


Figura 3.3. Ventilação para o lado esquerdo da estufa

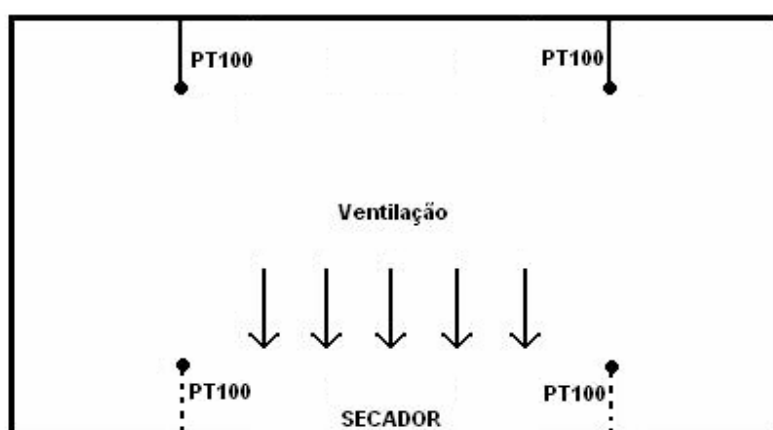


Figura 3.4. Ventilação para o lado direito da estufa

Porém o sistema de controle vigente não permitia esta expansão no número de sensores por questões físicas. O hardware do sistema de controle não possuía entradas analógicas livres para adicionar novos medidores e o software do sistema de controle também não permitia modificações pelo fato do dispositivo ser de origem comercial e seu conteúdo (software) ser protegido pelo fabricante.

Esta obstrução obrigou a adotar-se um segundo dispositivo de controle que atuaria em conjunto com o já existente.

Dessa forma o controlador original (Hardware 1 – Figura 3.5) ficou responsável pela medição e controle da variável  $T_{bu}$ , pelas medições dos pontos de umidade da madeira, pelo acionamento dos aspersores e dampers, pela definição da velocidade dos ventiladores e pela determinação das referências de temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) enviadas ao novo hardware (Hardware 2 – Figura 3.5), segundo o programa de secagem. Então o novo controlador ficou responsável apenas pelo controle de temperatura ( $T_{bs}$ ) no interior da câmara de secagem, que é a variável de interesse deste trabalho.

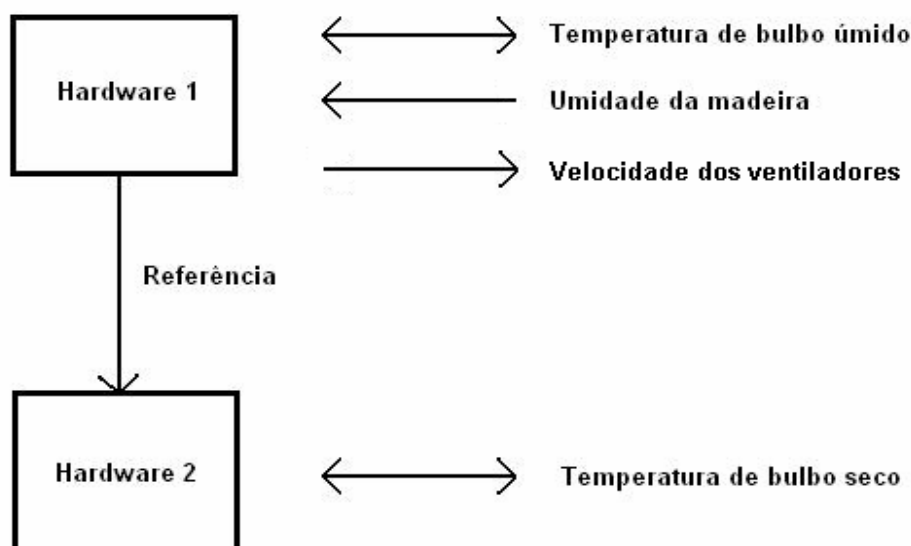


Figura 3.5.Estrutura do sistema de controle.

## 3.2 Sistema de atuação

Como nesta nova concepção optou-se por dividir o sistema de controle em duas partes e já há dois sensores disponíveis em cada lado do secador e, uma nova válvula de controle foi adicionada ao processo. Conforme mostra as figuras 3.6 e 3.7.

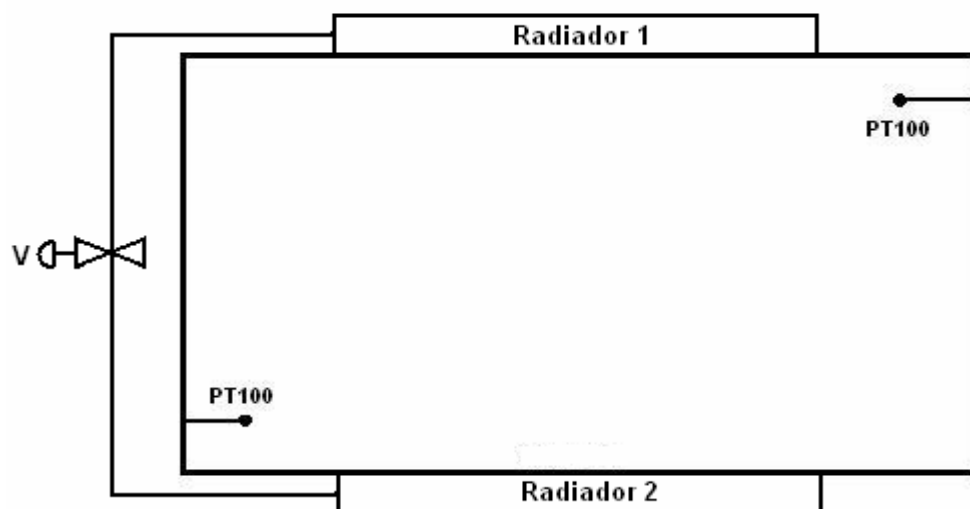


Figura 3.6.Estrutura do processo original

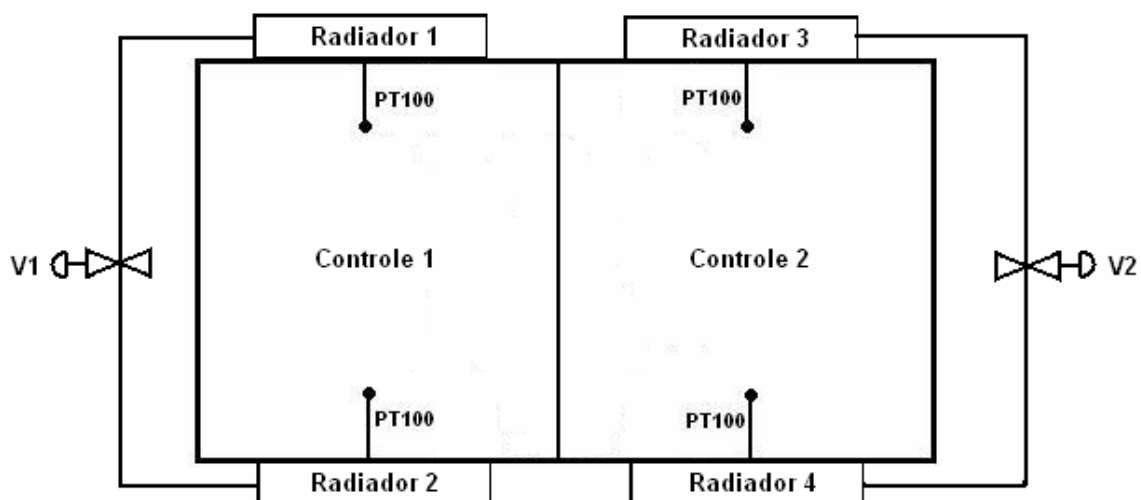


Figura 3.7.Estrutura do processo modificado

Então, no sistema de atuação, instalou-se uma entrada de vapor adicional. Esta nova entrada foi conseguida através da divisão da linha de vapor na entrada da estufa. Esta modificação proporcionou um grau extra de liberdade ao sistema de atuação, proporcionando regular independentemente o fluxo de vapor em cada metade do secador. Assim o novo sistema de controle passou a ter dois atuadores e dois medidores.

No sistema original (Figura 3.6) tinha-se apenas uma válvula de controle e apenas um sensor definido para um determinado sentido de ventilação, não sendo eficaz na compensação da distribuição não uniforme de calor no interior do secador.

No sistema proposto, o processo foi dividido em duas partes onde cada sistema de controle possui um atuador (válvula de aquecimento) e dois medidores (PT100) (sistemas de controle 1 e 2 da Figura 3.7). Desta forma, no sistema modificado, consegue-se controlar cada metade da estufa como se fossem “independentes”, conseguindo reduzir os efeitos da distribuição desuniforme de calor.

### 3.3 Sistema de supervisão

A aquisição de um controlador adicional proporcionou a possibilidade de mudanças no sistema de controle vigente. Porém para projetar um novo controlador tornava-se necessário a aquisição de dados de forma contínua para a análise do sistema, pois o novo controlador não permitia o armazenamento de um grande volume de dados, além de apresentar grandes obstáculos para a extração destes. A partir de então optou-se em implementar um sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition System).

Um SCADA é um sistema que integra *software* e *hardware* para permitir a aquisição de informação relativa ao estado duma instalação e para possibilitar uma vigilância e telecomando eficazes por parte de operadores especializados. Um SCADA pode supervisionar e telecomandar diversos tipos de instalações mas no contexto deste trabalho o SCADA está associado tipicamente ao processo de secagem de madeira. Este sistema da Elipse Software proporcionou a aquisição de dados de forma contínua e a monitoração do processo em tempo real.

O sistema supervísório teve como objetivo inicial monitorar os sensores do tipo Tbs existentes e os adicionados, provendo aos operadores de secagem uma supervisão confiável do processo. Através do sistema é possível detectar falhas em sensores e atuadores,

facilitando o sistema de manutenção e reduzindo os problemas de secagem causados por falhas destes equipamentos já que a identificação destas falhas é feita em tempo real.

Mais tarde, o software também proporcionou a interligação dos inversores de frequência juntamente com o novo controlador, em rede, facilitando a supervisão e o controle do processo por parte dos operadores de secagem. Através desta interligação é possível detectar o estado dos inversores de frequência (ligado, desligado ou em falha) e obter remotamente sua velocidade de operação. Em alguns casos é possível também identificar falhas em motores, através do desligamento do inversor. A interligação dos inversores juntamente com o novo controlador foi realizada através do protocolo de comunicação Modbus RTU.

### 3.3.1 Protocolo Modbus RTU

Modbus é um protocolo de transferência de mensagens da camada de aplicação, localizado no nível 7 do modelo de referência “OSI”, que provê a comunicação no modo mestre/escravo entre dispositivos conectados em diferentes tipos de redes e barramentos. Modbus é um protocolo do tipo requisição/resposta e oferece serviços especificados por códigos de funções. É definida uma estrutura de mensagens composta por bytes, a qual os dispositivos são capazes de reconhecer, independentemente do tipo de rede utilizada.

Durante o processo de comunicação, o Modbus determina como cada dispositivo:

- identifica seu próprio endereço na rede;
- reconhece se uma mensagem é endereçada a ele;
- determina qual o tipo de ação a ser executada;
- obtém as informações necessárias para a execução da ação.

No caso de ser necessário devolver uma resposta ao comando recebido, o dispositivo elabora uma mensagem e a envia, ou indica que ocorreu um erro no processo de comunicação.

O desenvolvimento do supervisório, bem como a interligação dos dispositivos em rede, realizado neste trabalho teve por objetivos principais a monitoração do sistema de controle de temperatura e de ventilação, porém a estrutura poderá ser estendida no futuro para outros medidores e atuadores instalados no processo. Na figura 3.8 é mostrado um esquemático da rede MODBUS RTU.

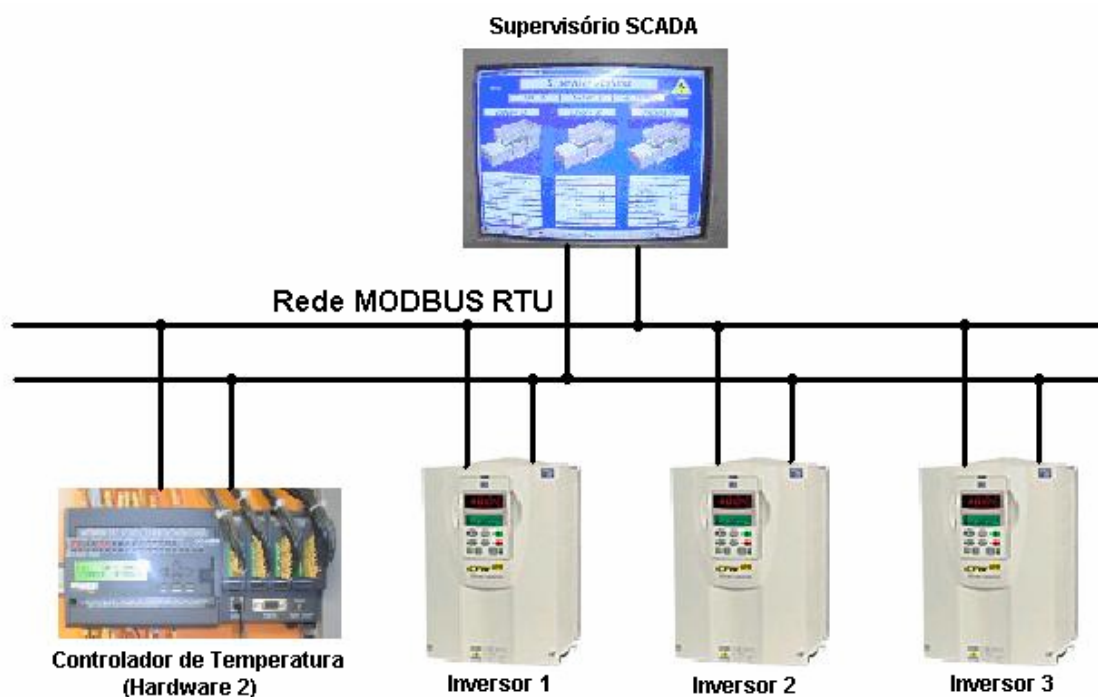


Figura 3.8. Esquemático da rede Modbus implementada.

### 3.4 Resultados

Os resultados decorrentes destas modificações nos sistemas de medição e atuação proporcionaram uma redução de quase sete vezes na máxima diferença de temperatura medida entre os extremos da estufa. Trabalhando em temperaturas de referência próximas de 82°C, a máxima diferença medida foi de 3°C, conforme mostra a tabela 3.2.



<i>Referência</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i><math>\Delta T</math> máximo</i>
82 °C	81 °C	79 °C	3 °C

Tabela 3.2. Tabela de diferenças de temperatura para o novo sistema

Os dados da tabela 3.2 são frutos de observações realizadas durante um período de 4 meses e representa o estado de operação do sistema em regime permanente mostrando a máxima diferença de temperatura encontrada com o sistema modificado em operação.

### 3.5 Conclusões do capítulo

Este capítulo apresentou as modificações realizadas no sistema de medição e atuação do secador. Com estas resolveu-se o primeiro problema apresentado no capítulo 2, referente a diferença de temperatura ao longo do comprimento do secador. Os resultados experimentais obtidos, com valores de diferença de temperatura entre extremos inferiores a 3°C, podem ser considerados muito bons dado que o fator de redução foi superior a seis.

O segundo problema estava relacionado com a grande oscilação da variável temperatura em torno da referência. Este problema pode ser resolvido projetado-se um novo algoritmo de controle e implementando-o no novo hardware de controle instalado no sistema. O ajuste e implementação desta estratégia se analisa no próximo capítulo.

## **Capítulo 4**

# **Modelagem do sistema e ajuste do controlador**

Para se obter um ajuste adequado do controlador de temperatura é necessário realizar uma modelagem do comportamento do processo. Este processo tem várias etapas, a primeira consiste em realizar um estudo das variáveis do sistema e suas correlações. Posteriormente define-se um método para equacionar ou identificar estas relações. Neste trabalho optou-se pela utilização do método de resposta ao degrau em conjunto com a técnica off-line de identificação recursiva. A modelagem, neste caso, tem como objetivo extrair um modelo do sistema para a sua região de operação, que encontra-se nas temperaturas entre 70°C e 90°C. É nesta faixa que o sistema se encontra em mais de 90% do tempo do processo de secagem.

## 4.1 Diagrama de blocos do sistema

Esta sessão tem como objetivo apresentar as relações entre as variáveis do sistema através de um diagrama de blocos como se mostra na Figura 4.1.

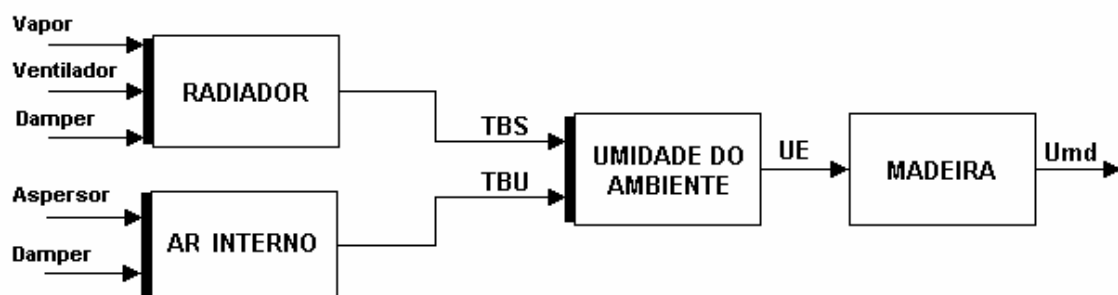


Figura 4.1. Diagrama de blocos do processo.

Quatro são as entradas de atuação no sistema: a quantidade de vapor injetado, a potência de ventilação, a abertura dos dampers e a quantidade de água injetada pelos aspersores. Tbs é dependente da quantidade de vapor injetada, da ventilação e da abertura dos dampers. Com a abertura dos dampers há a troca de ar úmido interno (quente) pelo ar seco externo (frio) baixando a umidade interna do ambiente, porém fazendo com que a temperatura interna (Tbs) também caia. Já Tbu é apenas função da quantidade de água injetada pelos aspersores e da abertura dos dampers. Os aspersores são utilizados para elevar o valor da variável Tbu e os dampers são usados para reduzir seu valor.

A umidade de equilíbrio do ambiente UE está diretamente relacionada pela relação entre as variáveis Tbs e Tbu. Esta umidade de equilíbrio do ambiente interno define finalmente a umidade da madeira Umd. As dinâmicas das variáveis Tbs e Tbu são da ordem de minutos, determinando diretamente a umidade de equilíbrio do ambiente. Já a dinâmica da variável Umd é da ordem de horas, podendo-se então considerar esta dinâmica como dominante dentro do processo de secagem.

Um estudo completo do sistema exigiria uma modelagem multivariável deste processo mas este trabalho está focado apenas na variável Tbs, pois, por interesse da empresa considerou-se que as demais variáveis estavam satisfatoriamente controladas pelo sistema de controle original. Assim, será apresentada somente a modelagem referente a relação entre a entrada de vapor e a variável de interesse (Tbs) mantendo-se fixa a velocidade da ventilação em 100%.

Para dar início ao processo de modelagem é necessário verificar a linearidade da faixa de operação. Este estudo é apresentado na sessão seguinte.

## 4.2 Análise da faixa de operação do sistema

Esta análise tem como objetivo verificar o grau de linearidade do sistema na faixa de operação definida. Para realizar esta análise foi-se gradualmente aumentando a porcentagem de abertura da válvula de aquecimento, dentro da faixa de operação do sistema, e registrando-se a temperatura interna do secador. A abertura da válvula deu-se em intervalos de 1% partindo de uma porcentagem inicial de abertura de 58% até a porcentagem final de 75%. Como resultado tem-se a figura 4.2.

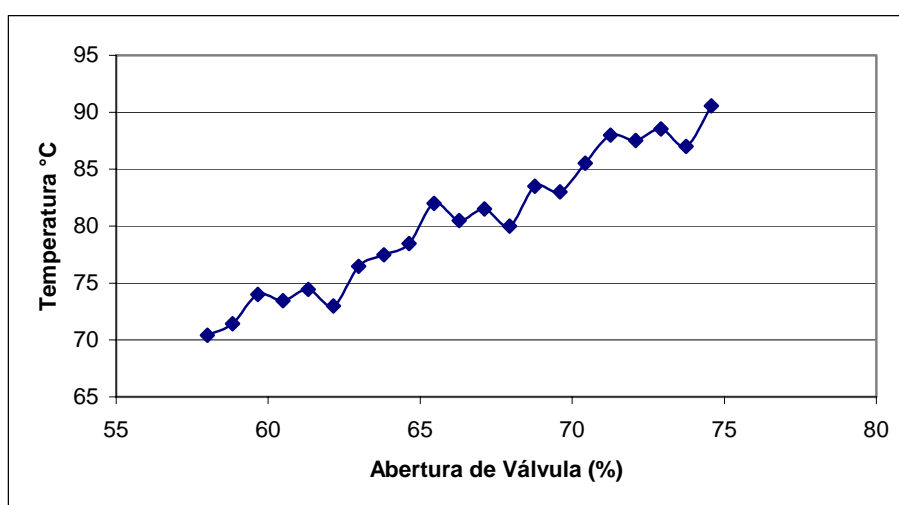


Figura 4.2. Abertura de Válvula (%) X Temperatura °C

Analisando o gráfico da figura 4.2 observa-se que os pontos obtidos com este experimento apresentam um desvio máximo de temperatura, em relação ao valor médio, de 3°C. Assim, na prática, pode-se considerar o comportamento do sistema como linear nesta faixa de operação, e realizar uma modelagem simples do tipo entrada saída utilizando a técnica de resposta ao degrau.

### 4.3 Resposta ao degrau

Segundo ASTRÖM e HÄGGLUND (1995) a dinâmica de um processo pode ser determinada através de uma resposta do processo à pulsos, degraus, rampas, ou outros sinais determinísticos.

A dinâmica de um sistema linear é, em princípio, unicamente dada por uma resposta transiente. Isto requer que o sistema esteja em repouso antes da entrada ser aplicada e que não existam erros de medição. Porém na prática é difícil garantir que o sistema esteja em repouso e que não existam erros de medição o que limita este método à determinação de modelos simples. Contudo as respostas transientes são freqüentemente suficientes para o ajuste de controladores do tipo PID e suas variantes.

Para realizar o experimento de resposta ao degrau é necessário primeiramente colocar o sistema no ponto de operação e aguardar que atinja o regime permanente. Em seguida aplica-se uma brusca variação na variável de controle (degrau) e registram-se os valores da variável de processo (ASTRÖM E HÄGGLUND, 1995). A mudança na variável de controle deve ser suficientemente grande para conseguir um máximo sinal em relação à amplitude dos ruídos.

É importante repetir o experimento para diferentes amplitudes dentro da faixa de operação do sistema com o objetivo observar a sua linearidade.

A resposta ao degrau é um conveniente método para caracterizar processos dinâmicos devido a sua simples interpretação física. Muitas técnicas de ajuste são baseadas neste

método. Um modelo matemático pode ser obtido da resposta ao degrau e métodos gerais podem ser utilizados para o projeto do sistema de controle.

A seguir são mostradas respostas ao degrau obtidas experimentalmente da câmara de secagem sob estudo. Cada amostra corresponde a um intervalo de tempo de 10 segundos e o degrau de entrada é aplicado no tempo zero.

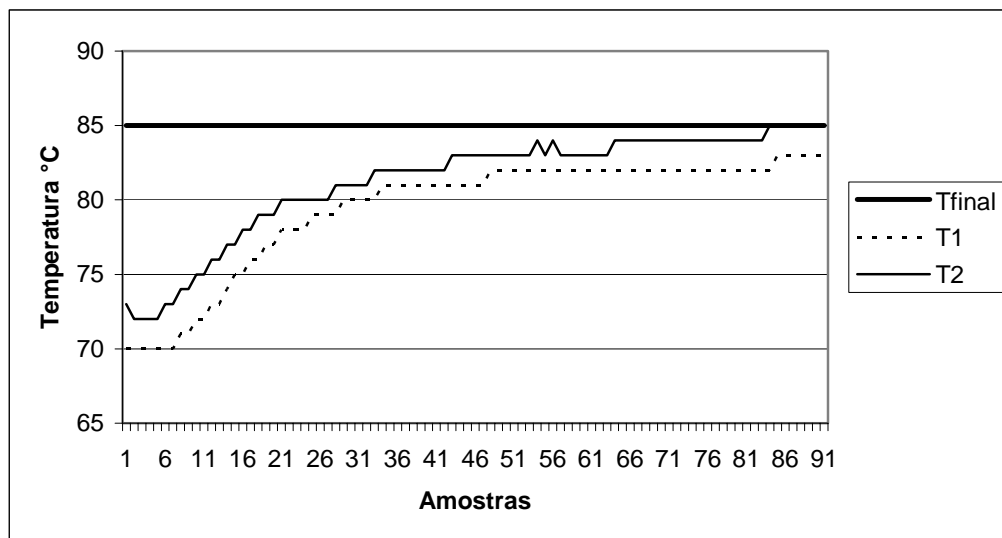


Figura 4.3. Resposta ao degrau para T1 e T2.

Na figura 4.3 é apresentado o resultado da resposta ao degrau com a ventilação direcionada ao lado onde estão localizados os sensores T1 e T2.

Com ambas as temperaturas em torno de 70°C é aplicado um degrau na válvula de controle para levar a saída (Tfinal) a 85°C.

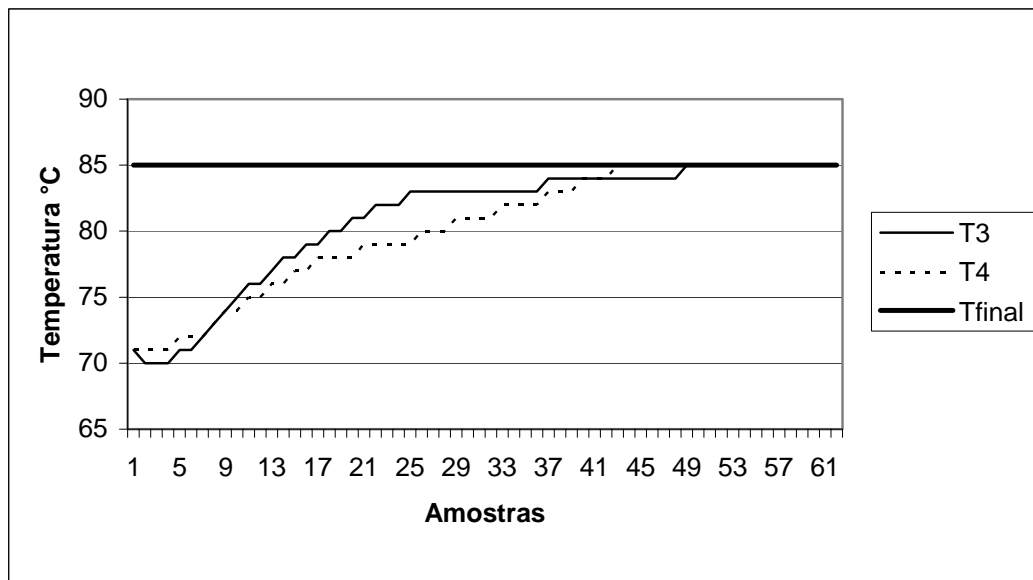


Figura 4.4. Resposta ao degrau para T3 e T4.

Na figura 4.4 é apresentado o resultado da resposta ao degrau com a ventilação direcionada ao lado onde estão localizados os sensores T3 e T4 para a mesma variação aplicada no caso anterior (70°C – 85°C).

Nas figuras 4.5 e 4.6 são repetidos os ensaios mostrados nas figuras 4.3 e 4.4, porém elevando a saída (Tfinal) para 90°C.

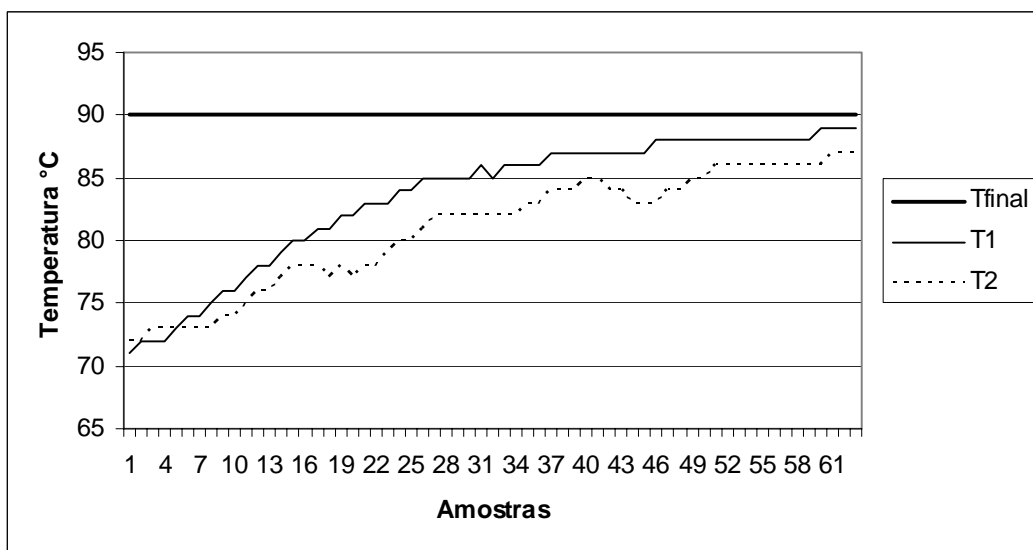


Figura 4.5. Resposta ao degrau para T1 e T2.

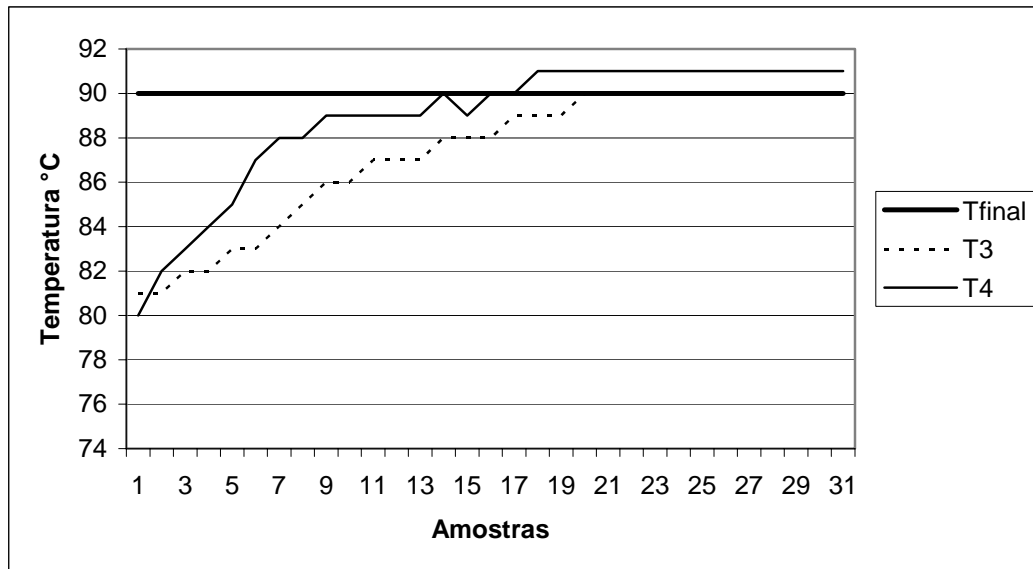


Figura 4.6. Resposta ao degrau para T3 e T4.

Observando as formas das respostas obtidas anteriormente pode-se considerar o sistema como sendo predominante de primeira ordem com atraso. O modelo proposto para o sistema é composto de três parâmetros: o ganho ( $K_p$ ), a constante de tempo ( $\tau$ ) e o atraso de transporte ( $T$ ).

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + \tau s} e^{-sT}$$

Para obter o modelo matemático do sistema foi utilizado o método de identificação baseado na técnica de mínimos quadrados.

## 4.4 Estimador dos mínimos quadrados não-recursivos

Karl Friedrich Gauss formulou o princípio dos “Mínimos Quadrados” ao final do século 18 para previsão da trajetória de planetas e cometas a partir das observações



realizadas. Gauss estabeleceu que os parâmetros desconhecidos de um modelo matemático deveriam ser relacionados de modo que:

“ O valor mais provável das grandezas desconhecidas é a que minimiza a soma dos quadrados da diferença entre os valores atualmente observados e os valores calculados multiplicados por números que medem o grau de precisão, onde mais precisa a medida maior a ponderação ”

Considere um processo físico caracterizado por uma entrada,  $u(t)$ , uma saída,  $y(t)$ , uma perturbação  $e(t)$  e com função de transferência discreta linear da forma

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t) + e(t) \quad (4.1)$$

onde

“ $z$ ” representa o operador deslocamento.

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{na}z^{-na}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{nb}z^{-nb}$$

e cuja representação por uma equação a diferenças é

$$y(t) = -a_1y(t-1) - a_2y(t-2) - \dots - a_{na}y(t-na) + b_0u(t-d) + b_1u(t-d-1) + \dots + b_{nb}u(t-d-nb) + e(t) \quad (4.2)$$

Observações:

- para o modelo da equação (3.2) tem-se  $(na + nb + 1)$  parâmetros a estimar;-

para determinar os  $a_i$  ( $i = 1, \dots, na$ ) e  $b_j$  ( $j = 0, \dots, nb$ ) deve-se utilizar as medidas de entrada e saída do processo;

- o termo  $e(t)$  pode representar o erro de modelagem, o erro de medição ou o ruído na saída do tipo estocástico, determinístico ou “offset”.

Definindo-se o vetor de medidas,  $\phi(t)$  com dimensão  $[(na + nb + 1) \times 1]$

$$\phi(t) = [-y(t-1) -y(t-2) \dots -y(t-na) \ u(t-d) \dots u(t-d-nb)] \quad (4.3)$$

e o vetor de parâmetros:

$$\theta(t) = [a(1) \ a(2) \ \dots \ a(n_a) \ b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{n_b}] \quad (4.4)$$

pode-se reescrever a equação (3.2) como:

$$y(t) = \phi^T(t) \theta(t) + e(t) \quad (4.5)$$

que é denominado modelo de regressão linear.

A estimativa do vetor de parâmetros,  $\theta'$ , pode ser obtida pelo procedimento dos mínimos quadrados (“least square approach”). Utilizando a estimativa  $\theta'$ , a melhor previsão da saída do sistema,  $y'$ , é calculada por

$$y' = \Phi \theta' \quad (4.6)$$

e o erro de previsão,  $\epsilon$ , é avaliado de acordo com

$$\epsilon = y - y' = y - \Phi \theta' \quad (4.7)$$

O estimador dos mínimos quadrados ponderado (estimador de Markov) é obtido minimizando o seguinte critério:

$$J = \min \|\ y - \Phi \theta' \|^2 \quad (4.8)$$

$$J = [y - \Phi \theta']^T W [y - \Phi \theta'] \quad (4.9)$$

Derivando a equação (3.9) em relação a  $\theta'$  e igualando a zero tem-se que

$$\theta' = [\Phi^T W \Phi]^{-1} \Phi^T W Y \quad (4.10)$$

O estimador dos mínimos quadrados, equação (3.10), é uma transformação linear sobre  $Y$  (função linear das medidas) e, assim, é denominado de estimador linear.

Para a aplicação do estimador dos mínimos quadrados (figura 4.7), todas as medidas devem estar disponíveis “a priori” para análise, e não existe limitação no tempo de processamento do algoritmo (identificação “off-line”) (COELHO, 2003).

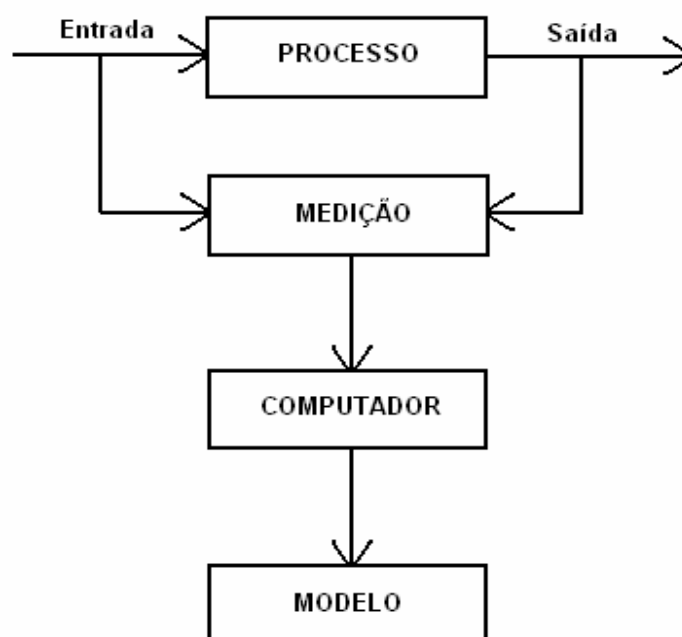


Figura 4.7. Identificação “off-line”.

Para a identificação off-line do modelo do secador, foi utilizado o “toolbox” do Matlab, conhecido como “System Identification”. (MATLAB, 2002).

Foram realizados ensaios ao degrau para determinar o modelo do secador. Para realizar tal tarefa determinou-se a partir de cada sensor um modelo representativo do sistema. Partindo deste ponto determinou-se um modelo para cada metade do secador, sendo estes utilizados como parâmetros para o projeto do controlador. Relembrando que internamente tem-se quatro termômetros do tipo Tbs, e portanto obteve-se quatro modelos distintos.

Para cada sensor são mostradas, respectivamente, duas curvas relativas a dois ensaios ao degrau. Os degraus representam valores percentuais de abertura da válvula de aquecimento. Os ensaios indicados com a letra “a” representam a resposta ao degrau de 60% para 70% de abertura de válvula, que corresponde a uma variação de 15°C da temperatura. Os ensaios

indicados pela letra “b” representam a resposta ao degrau de 60% para 75% de abertura de válvula que corresponde a uma variação de 20°C da temperatura. Para normalizar o processo de identificação da planta, os dados referentes à temperatura (eixo y) foram normalizados. No caso “a”, o valor 1 no eixo “y” corresponde a temperatura de 85°C e no caso “b”, o valor 1 no eixo “y” corresponde a temperatura de 90°C. O valor base de ambos os gráficos (a e b) corresponde a temperatura de 70°C.

O modelo final do processo foi determinado pela média entre os modelos obtidos. As figuras 4.8 – 4.15 comparam a resposta do modelo identificado e do processo para os casos analisados. As figuras 4.8 e 4.9 mostram os resultados para o sensor 1.

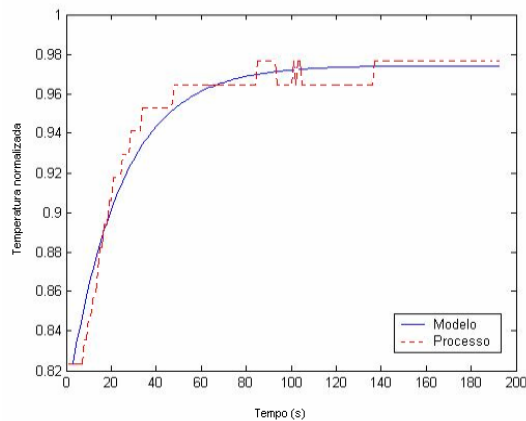


Figura 4.8. Modelo 1a x processo

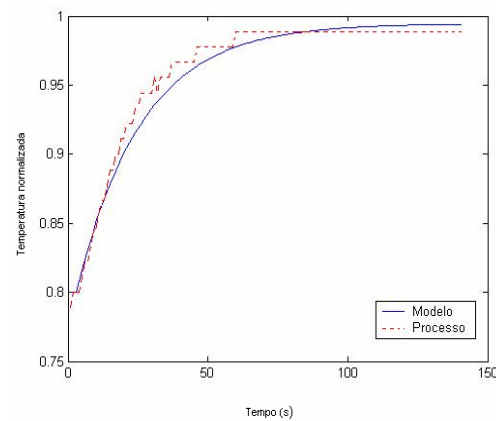


Figura 4.9. Modelo 1b x processo

Para o sensor 2 seguem as seguintes curvas (figura 4.10 e 4.11).

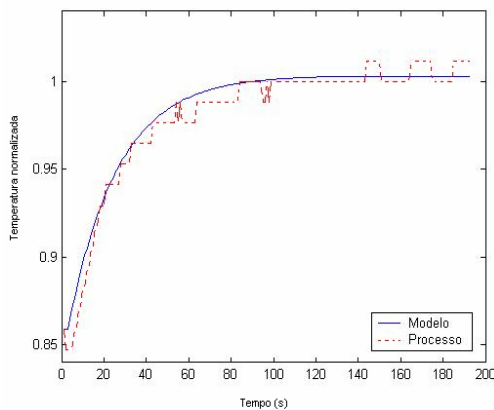


Figura 4.10. Modelo 2a x processo

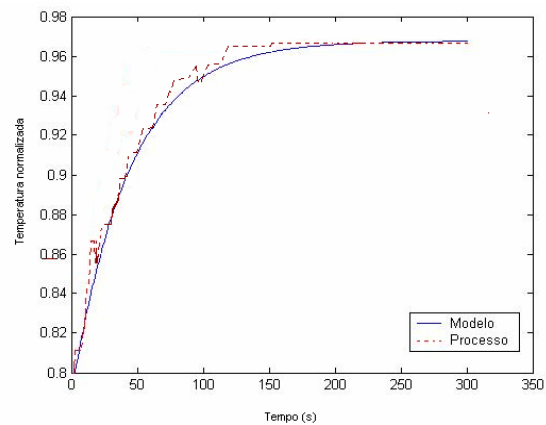


Figura 4.11. Modelo 2b x processo

Para o sensor 3 tem-se as figuras 4.12 e 4.13 como resultados.

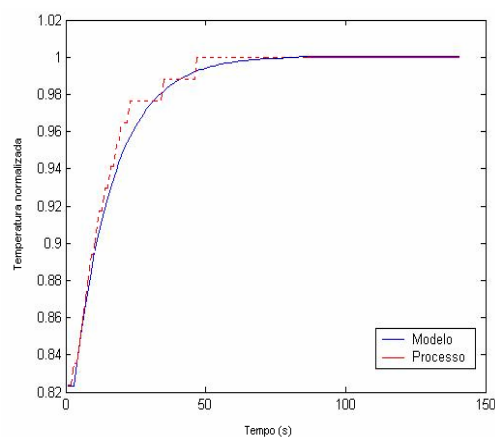


Figura 4.12. Modelo 3a x processo

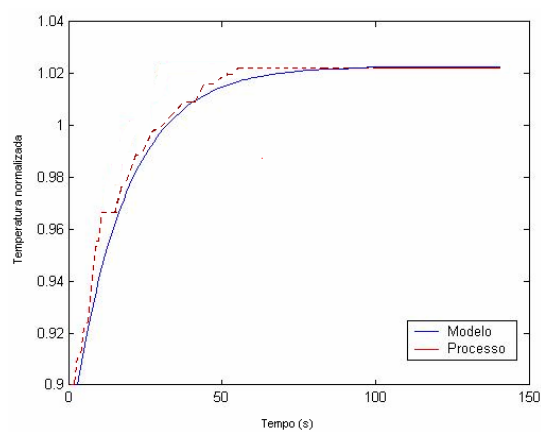


Figura 4.13. Modelo 3b x processo

Para o último sensor apresentam-se as figuras 4.14 e 4.15.

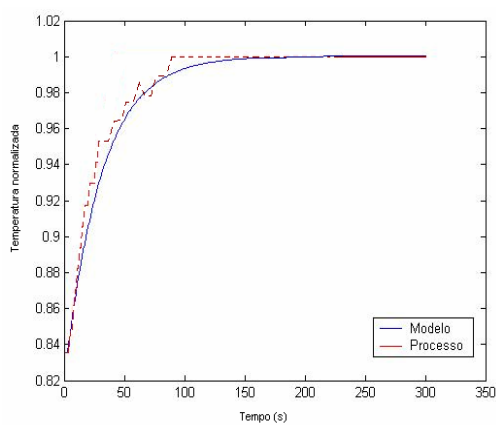


Figura 4.14. Modelo 4a x processo

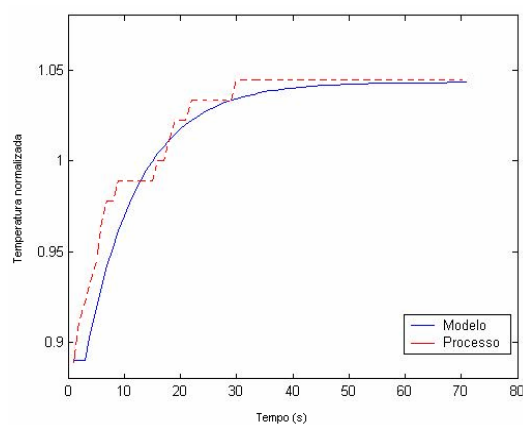


Figura 4.15. Modelo 4b x processo

A tabela 4.1 mostra os modelos discretos obtidos para cada processo identificado.

<b>Modelo 1a.</b>	<b>Ta</b>	<b>Ganho</b>	<b>Pólos</b>
$\frac{0.0407}{z^3 - 0.9582z^2}$	10s	0.9732	0 0 0.9582
<b>Modelo 1b.</b>	<b>Ta</b>	<b>Ganho</b>	<b>Pólos</b>
$\frac{0.04609}{z^3 - 0.9539z^2}$	10s	0.9996	0 0 0.9539
<b>Modelo 2a.</b>	<b>Ta</b>	<b>Ganho</b>	<b>Pólos</b>
$\frac{0.04265}{z^3 - 0.9569z^2}$	10s	0.9903	0 0 0.9569
<b>Modelo 2b.</b>	<b>Ta</b>	<b>Ganho</b>	<b>Pólos</b>
$\frac{0.022}{z^3 - 0.9773z^2}$	10s	0.9691	0 0 0.9773
<b>Modelo 3a.</b>	<b>Ta</b>	<b>Ganho</b>	<b>Pólos</b>
$\frac{0.06802}{z^3 - 0.9322z^2}$	10s	1.0036	0 0 0.9322
<b>Modelo 3b.</b>	<b>Ta</b>	<b>Ganho</b>	<b>Pólos</b>
$\frac{0.06802}{z^3 - 0.9322z^2}$	10s	1.0237	0 0 0.9435
<b>Modelo 4<sup>a</sup>.</b>	<b>Ta</b>	<b>Ganho</b>	<b>Pólos</b>
$\frac{0.0323}{z^3 - 0.9677z^2}$	10s	1.0013	0 0 0.9677
<b>Modelo 4b.</b>	<b>Ta</b>	<b>Ganho</b>	<b>Pólos</b>
$\frac{0.1036}{z^3 - 0.9007z^2}$	10s	1.0432	0 0 0.9007

Tabela 4.1. Apresenta os modelos resultantes dos ensaios ao degrau.

Terminada a identificação individual para cada termômetro determinou-se o modelo para cada metade do secador. Para a primeira metade calculou-se a média entre os modelos 1a, 1b, 3a e 3b (frente do secador – Figura 4.16). E para a segunda metade (fundo do

secador – Figura 4.17) o modelo foi determinado através da média entre os modelos 2a, 2b, 4a e 4b.

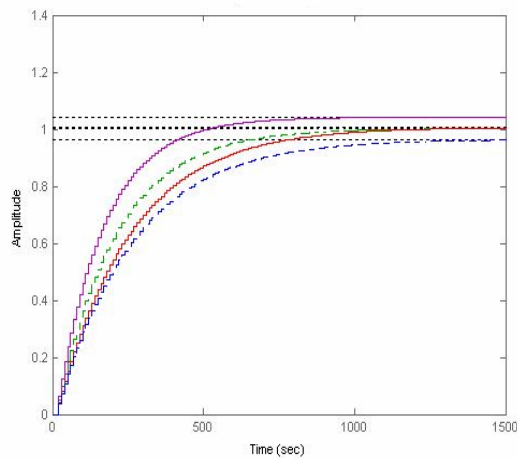


Figura 4.16. Curvas p/ modelos 1a, 1b, 3a e 3b.

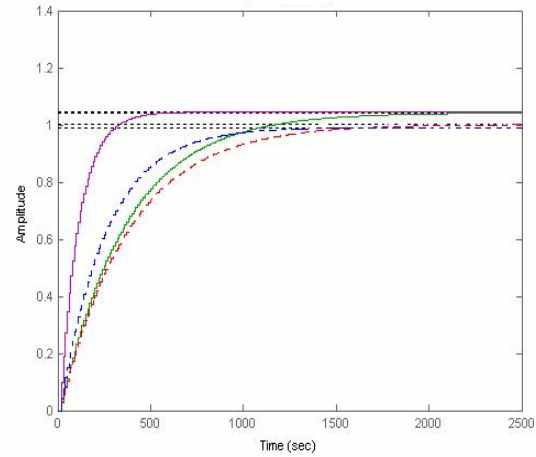


Figura 4.17. Curvas p/ modelos 2a, 2b, 4a e 4b.

<b>Modelo – Frente do Secador</b>	<b>Ta</b>	<b>Ganho</b>	<b>Pólos</b>
$\frac{0.0532}{z^3 - 0.9471z^2}$	10s	1.006	0 0 0.9471
<b>Modelo – Fundo do Secador</b>	<b>Ta</b>	<b>Ganho</b>	<b>Pólos</b>
$\frac{0.0500}{z^3 - 0.9510z^2}$	10s	1.02	0 0 0.9510

Como os parâmetros dos modelos referentes as partes da frente e fundo do secador são muito próximos, optou-se por simplificação, considerar um modelo único através da média dos dois modelos obtidos.



Desta forma tem-se como modelo final para o secador:

Modelo Final	Ta	Ganho	Pólos
$\frac{0.0516}{z^3 - 0.949z^2}$	10s	1.01	0 0 0.949

Na figura 4.18 mostra-se a curva de resposta ao degrau simulada referente ao modelo final que apresenta uma resposta do tipo constante de tempo dominante, já que o atraso do sistema é menor que 100 vezes a constante de tempo.

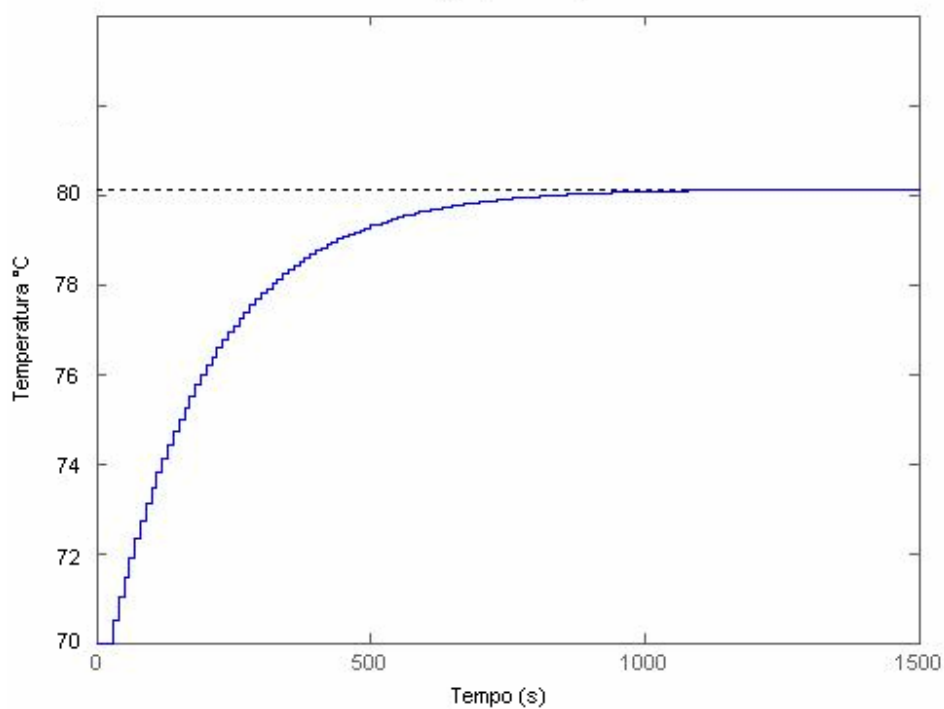


Figura 4.18. Resposta ao degrau referente ao modelo do secador.

O processo estudado não possui atuadores específicos para abaixar a temperatura do secador. Como consequência disto tem-se diferentes dinâmicas para a elevação de temperatura interna e para a redução da temperatura.

Como existem apenas atuadores para a elevação de temperatura (válvulas de aquecimento) não é possível reduzir a temperatura de maneira forçada. Quando se pretende reduzir a temperatura interna fecham-se as válvulas de aquecimento e espera-se a queda de temperatura através das perdas térmicas e das trocas entre ar interno e externo, onde neste último o ar está a uma temperatura mais baixa. É possível abrir os dampers para forçar esta troca de ar, porém não é utilizado para este fim pelo fato de que com sua abertura a umidade interna também baixa, sendo esta consequência não desejável.

Um outro fenômeno importante que influencia no sistema de controle é a ventilação. Nas figuras 4.19 e 4.20 mostra-se a influência do sentido da ventilação na temperatura do secador. Observa-se como o sinal de referência de temperatura  $Y_r$  somente é seguido por uma das temperaturas internas.

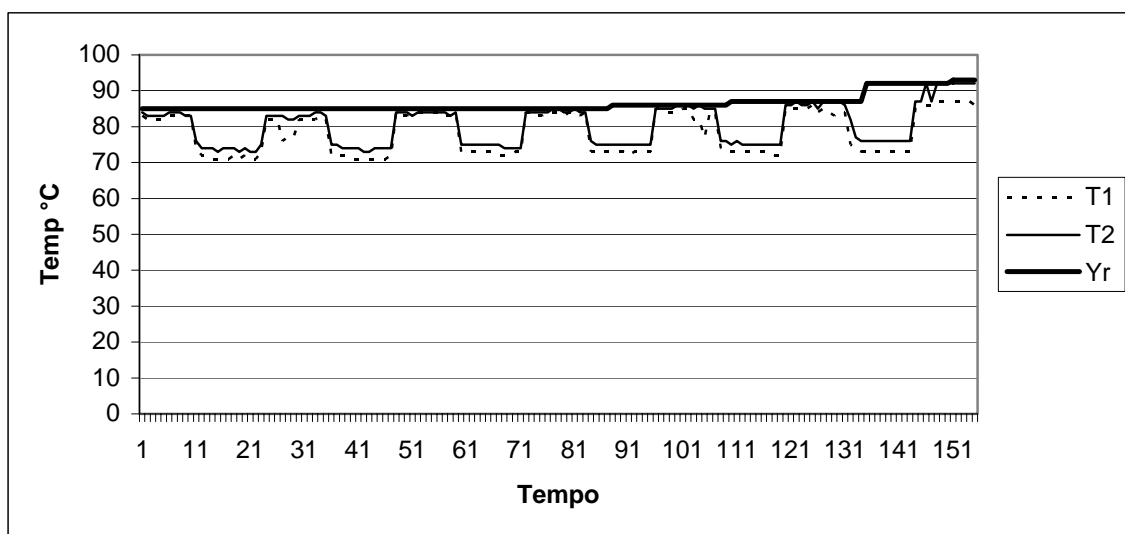


Figura 4.19. Influência do sentido da ventilação para  $T_1$  e  $T_2$ .

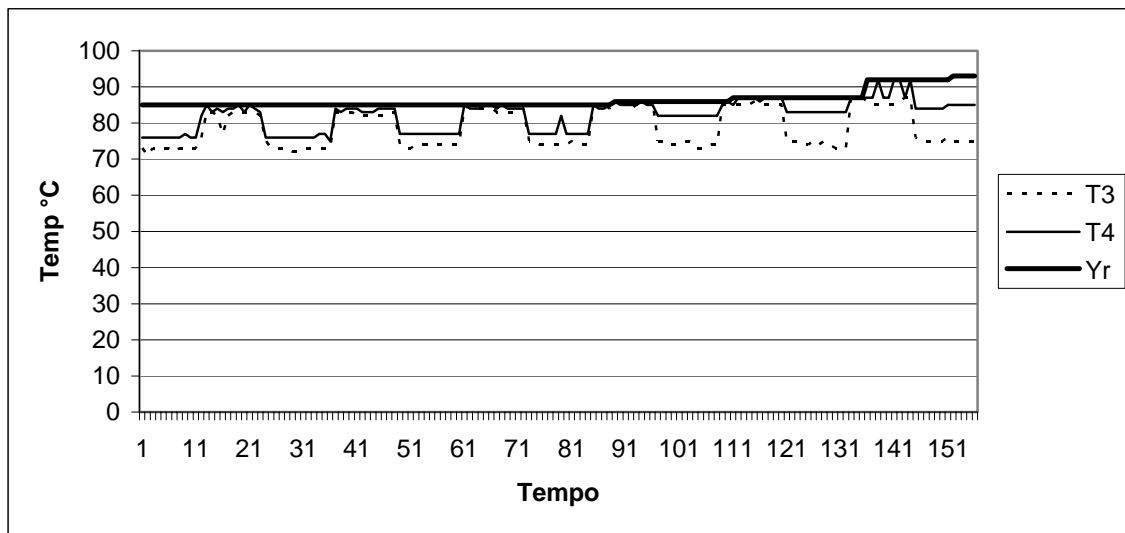


Figura 4.20. Influência do sentido da ventilação para T3 e T4.

Isto mostra a completa relação entre o sentido da ventilação e leitura das temperaturas por parte dos sensores. Quando a ventilação está para voltada para o lado dos sensores T1 e T2, estes passam a ler valores de temperatura superiores a T3 e T4 e neste momento são utilizados pelo sistema de controle para seguimento de referência.

## 4.5 Projeto e ajuste do controlador

O objetivo principal do projeto do novo controlador é reduzir a oscilação da variável temperatura em torno da referência.

Devido ao fato do sistema em malha aberta apresentar uma resposta predominante de primeira ordem, e com um pequeno atraso comparado com a constante de tempo do sistema, optou-se por utilizar um controlador do tipo PI (proporcional-integral) para garantir o seguimento à referência em regime permanente.

Os parâmetros do controlador foram calculados para reduzir o tempo de resposta ao degrau em MA, porém sem que haja oscilações, e rejeitar perturbações de carga do tipo degrau.

A seguir (Figura 4.21) tem-se o gráfico de lugar das raízes e diagrama de bode referente ao modelo do sistema.

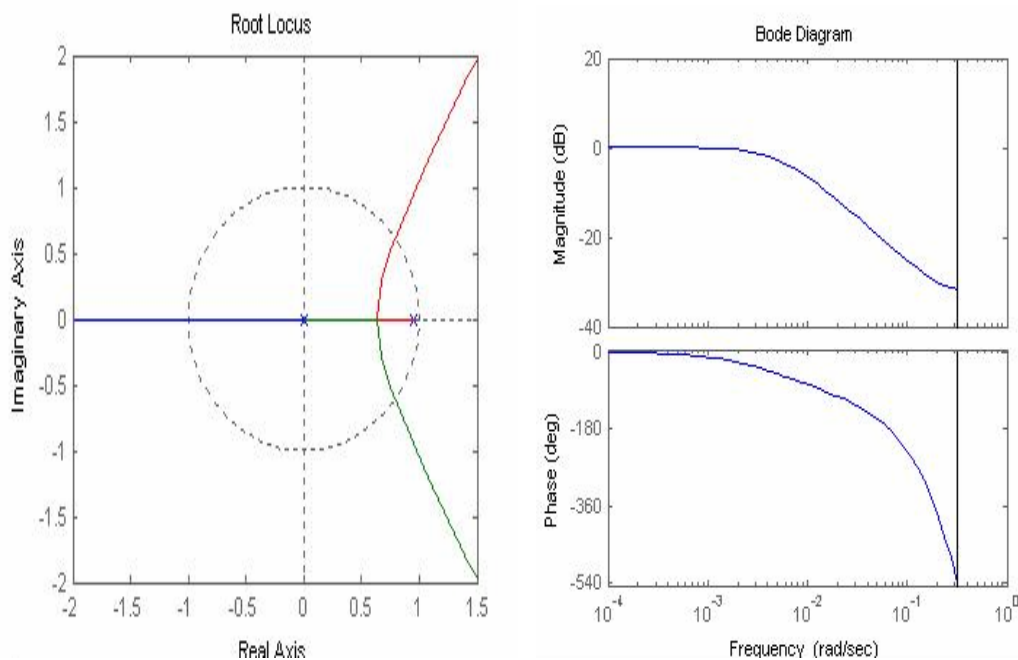


Figura 4.21. Lugar das raízes e diagrama de bode do sistema em malha aberta.

Com a ajuda da ferramenta “rltool” do Matlab foi projetado o seguinte controlador:

$$C(z) = \frac{3.3563(z - 0.912)}{z - 1}$$

$$T_a = 10s$$

Os parâmetros do controlador  $C(z)$  foram ajustados para obter uma rápida resposta às perturbações de carga com erro nulo em regime permanente. Para evitar o aparecimento do sobre sinal na resposta ao degrau em malha-fechada foi adicionado um filtro de referência,  $F(z)$ . O pólo do filtro anula a influência do zero do controlador e o zero do filtro é ajustado para acelerar a resposta dinâmica ao degrau em malha-fechada.

$$F(z) = \frac{0.58667(z - 0.85)}{z - 0.912}$$

Na figura 4.22 tem-se o lugar das raízes referente ao sistema em malha fechada.

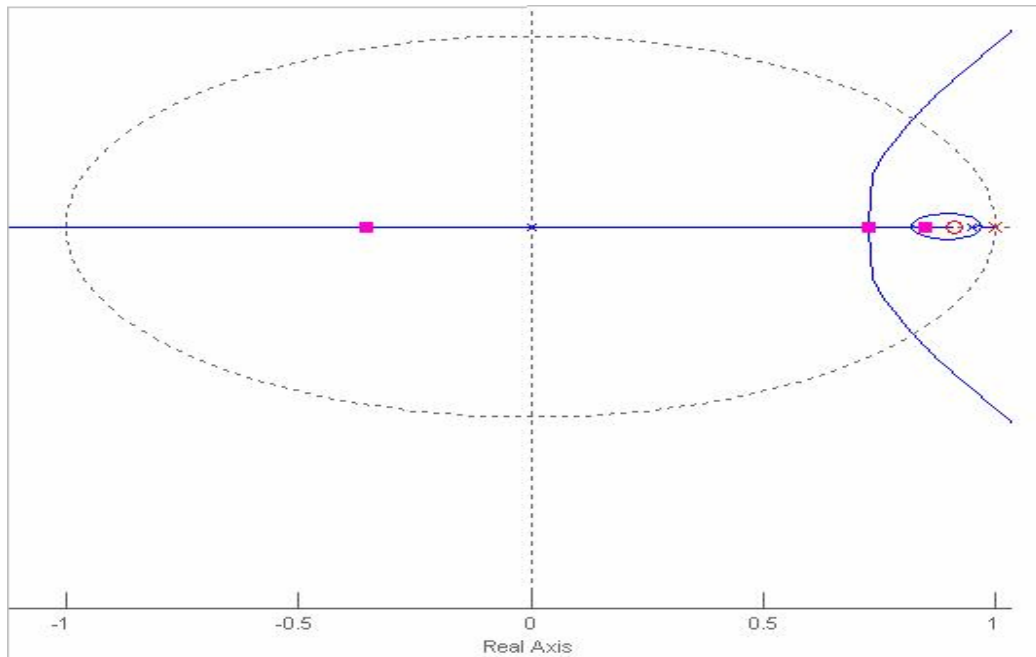


Figura 4.22. Lugar das raízes para o sistema em malha fechada.

Os pólos de malha fechada ficaram localizados nas seguintes posições:

$P_1$	-0.353
$P_2$	0.85
$P_3$	0.726
$P_4$	0.726

Nas Figuras 4.23 e 4.24, tem-se respectivamente o gráfico de resposta ao degrau juntamente com o sinal de controle e o gráfico de resposta a perturbações de carga mais o sinal de controle. A perturbação de carga corresponde a uma simulação de abertura

completa dos dampers (100%) ocasionando uma queda de temperatura. Para fins de simulação estipulou-se o degrau de perturbação como uma entrada negativa de 5°C.

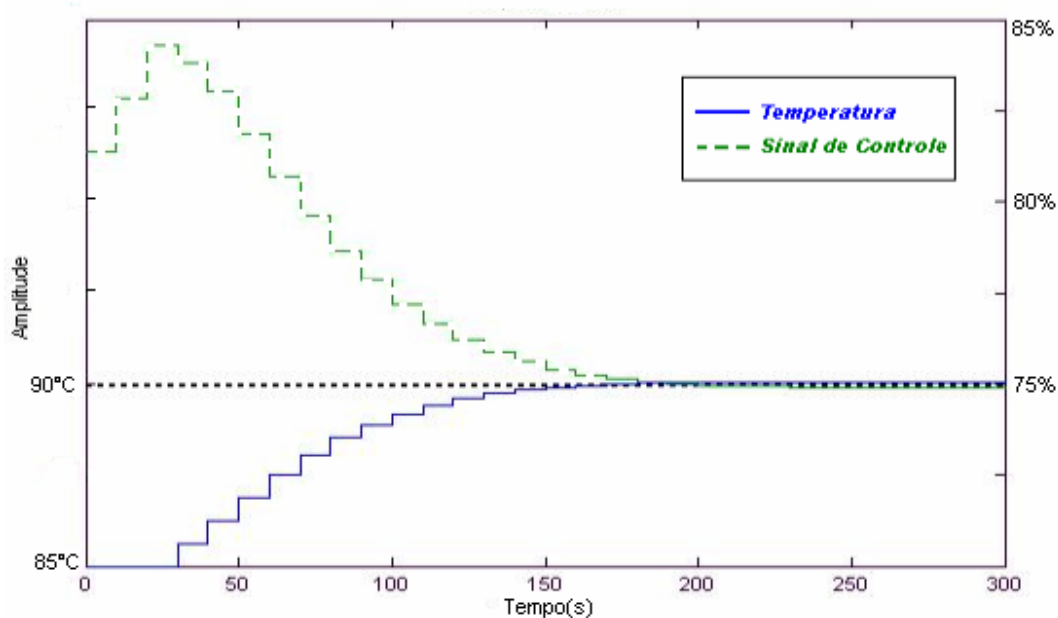


Figura 4.23. Simulação de resposta ao degrau para o sistema em malha fechada.

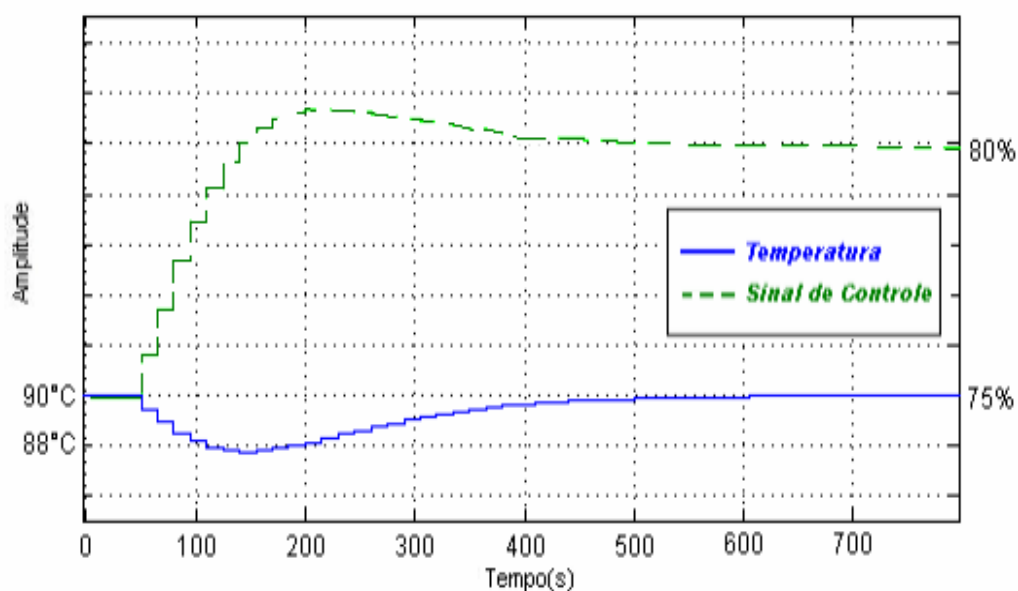


Figura 4.24. Simulação de resposta a perturbações de carga para o sistema em malha fechada.

Os valores do eixo “y” localizados a esquerda do gráfico correspondem a temperatura do sistema em °C. E os valores do eixo “y” localizados a direita do gráfico representam o sinal de controle (abertura de válvula) em valores percentuais.

Após as simulações o controlador PI foi colocado em prática, porém as respostas obtidas não forma as esperadas. O problema encontrado foi a freqüente saturação do sinal de controle, o que acarretava constantemente no desligamento da ação integral através do sistema anti-windup.

Na prática observou-se que o controlador funcionava apenas com a ação proporcional devido a saturação do sinal de controle. O motivo da saturação está relacionado com insuficiência da vazão de vapor dentro da rede de alimentação onde se encontram os secadores. Dentro desta rede existem outros equipamentos produtivos também consumidores de vapor cujo consumo é tão elevado que reduz a vazão de vapor a níveis insuficientes para manter ou aumentar a temperatura dos radiadores e conseqüentemente do ar interno do secador.

Devido a este impedimento o controlador foi reajustado para operar de forma unicamente proporcional, já que a solução para o problema depende de uma modificação do processo.

Na Figura 4.25 mostram-se os dados que comprovam a freqüente saturação do sinal de controle.

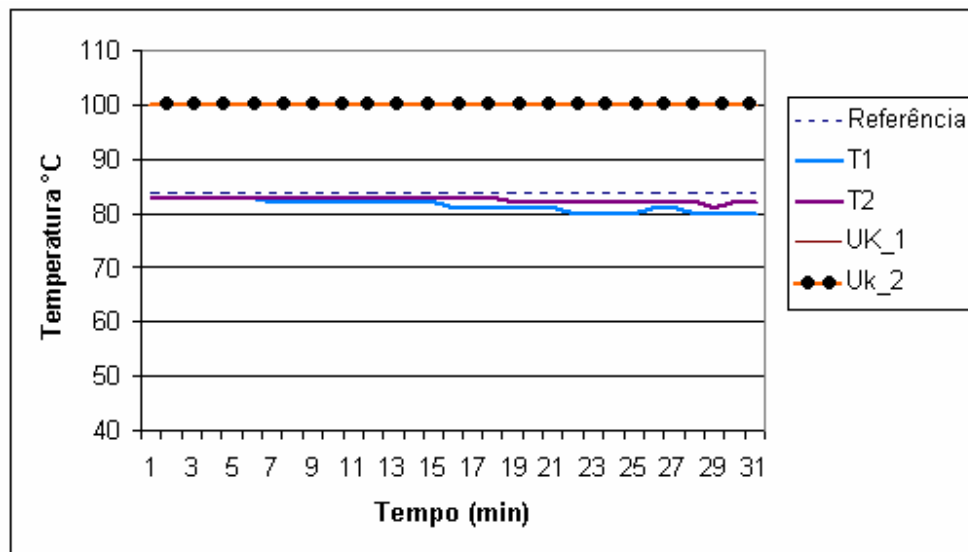


Figura 4.25. Saturação do sinal de controle

Como se observa na figura 4.25, mesmo em regime permanente e durante 30 minutos o sinal de controle tanto referente à frente do secador (uk\_1) quanto a parte do fundo (uk\_2) permanecem saturados (100%) invariavelmente (no gráfico o sinal uk\_1 está superposto ao sinal uk\_2).

Para o novo controlador puramente proporcional foi definido um ganho  $K = 80\%$ , que procura novamente um compromisso entre resposta rápida ao degrau e a rejeição de perturbações. Na figura 4.26 tem-se o lugar das raízes em malha fechada para o novo controlador.



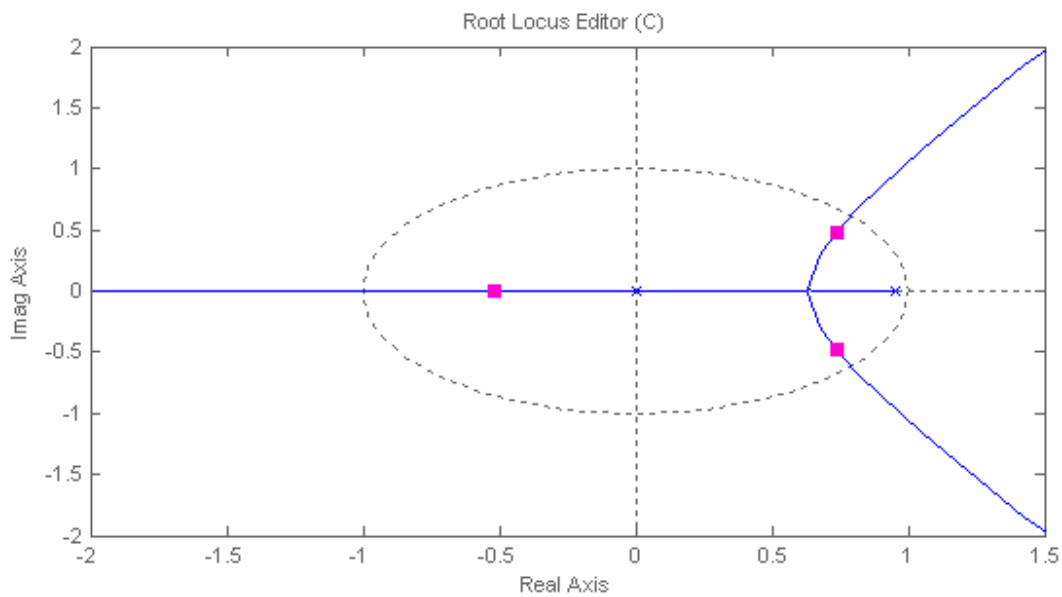


Figura 4.26. Lugar das raízes para o sistema em malha fechada com controle proporcional.

Os novos pólos de malha fechada estão em:

$P_1$	-0.529
$P_2$	$0.739 + 0.485i$
$P_3$	$0.739 - 0.485i$

Nas figuras 4.27 e 4.28 tem-se as simulações referentes à resposta ao degrau, com o sinal de controle, e ao degrau de perturbação, também com o sinal de controle.

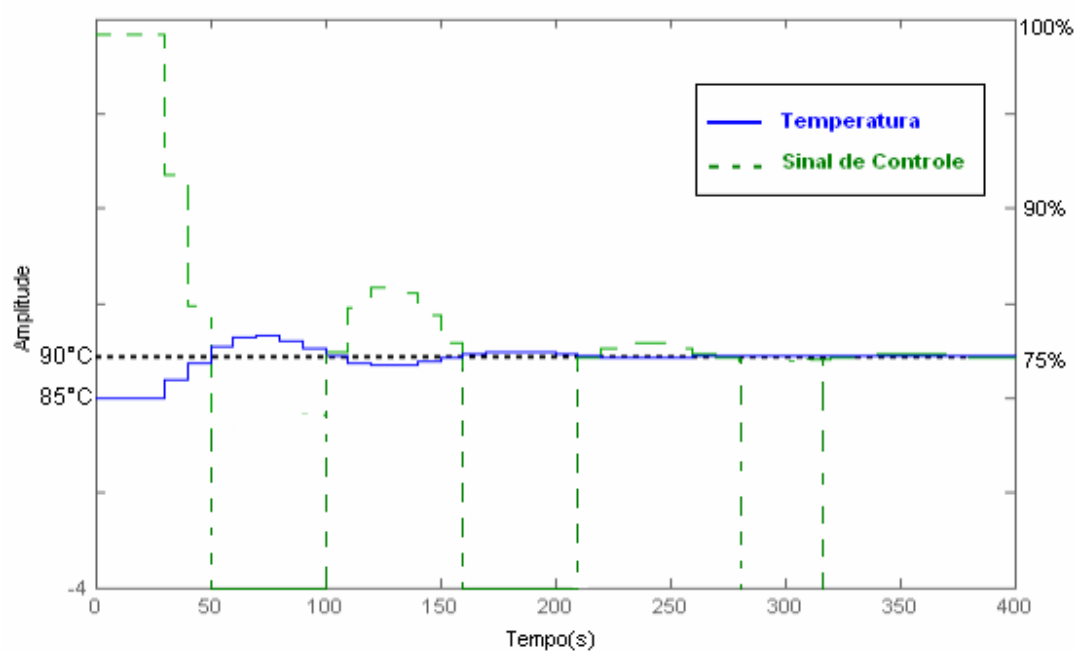


Figura 4.27. Simulação de resposta ao degrau para o sistema em malha fechada com controle proporcional.

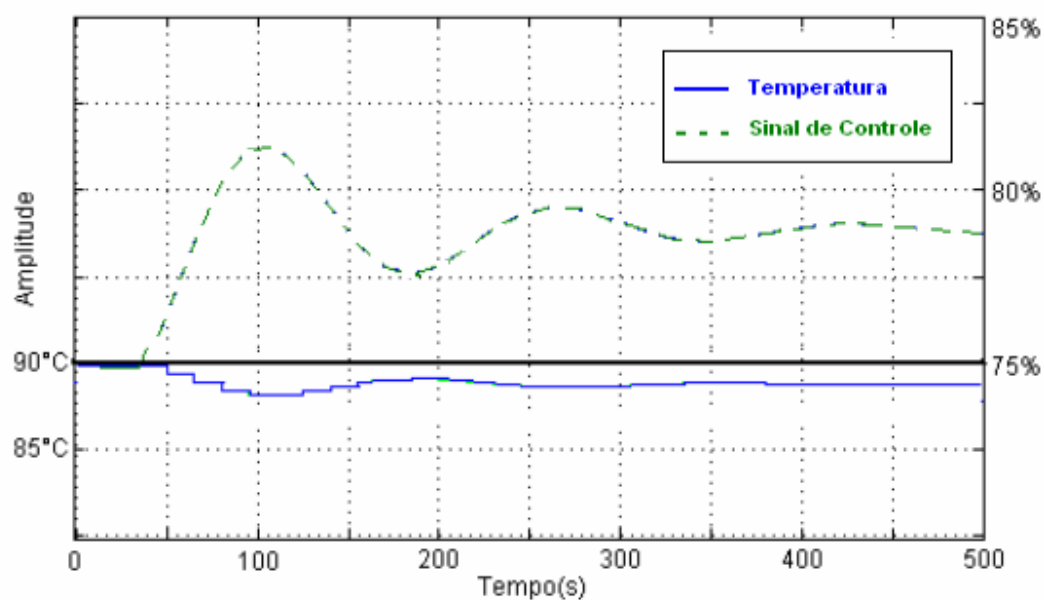


Figura 4.28. Simulação de resposta à perturbação para o sistema em malha fechada com controle proporcional.

Os valores do eixo “y” localizados a direita do gráfico correspondem a temperatura do sistema em °C. E os valores do eixo “y” localizados a esquerda do gráfico representam o sinal de controle (abertura de válvula ) em valores percentuais.

Neste caso os valores teóricos de erro em regime permanente e fator de rejeição de perturbações são:

- *Erro em regime permanente* = 0.5%;
- *Fator de rejeição* = 2%.

Enfim o controlador projetado foi implementado na prática e os resultados são mostrados sessão seguinte.

## 4.6 Resultados experimentais

Nesta sessão serão apresentados resultados experimentais mostrando as melhorias obtidas em termos de controle e qualidade e produtividade.

Com relação ao sistema de controle pode-se observar através dos seguintes gráficos e tabela a significativa melhora. O novo sistema de controle proporcionou uma significativa redução da oscilação da variável de controle sobre a referência e ainda uma pequena diferença de temperatura ao longo do comprimento do secador, que manteve-se em torno de 3°C. Estes resultados podem ser observados nas figuras 4.29-4.32 e na tabela 4.2.

No gráfico da figura 4.29 podem-se observar claramente os problemas existentes no sistema de controle original. A resposta em regime permanente é caracterizada como oscilatória, e ainda é possível observar uma grande diferença de temperatura entre os termômetros T1 e T2 o que implica numa distribuição não uniforme de temperatura ao longo do secador.

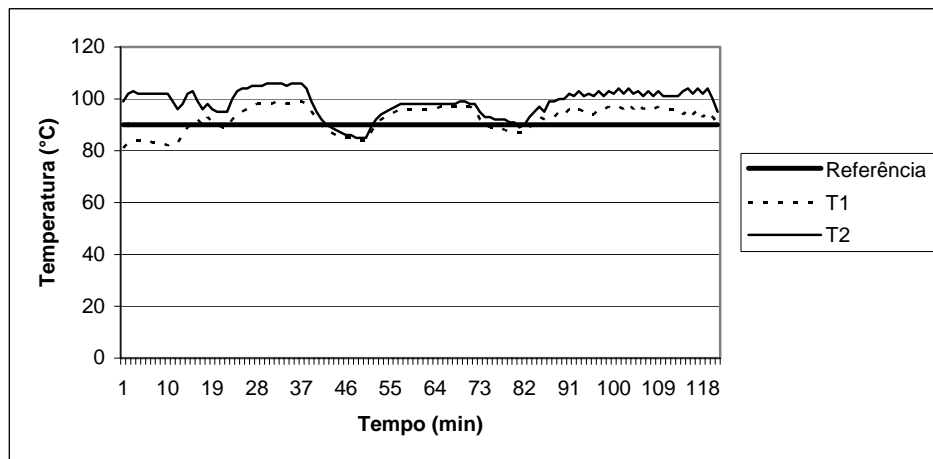


Figura 4.29. Curva de resposta em regime permanente do sistema de controle original em malha fechada.

Na figura 4.30 mostram-se os resultados de operação em regime permanente do sistema de controle de temperatura. É possível notar nitidamente a redução da oscilação da variável controlada e da diferença de temperatura entre os termômetros. Porém, ainda observa-se uma oscilação de menor amplitude em torno do ponto de operação que são o resultado da saturação do sinal de controle.

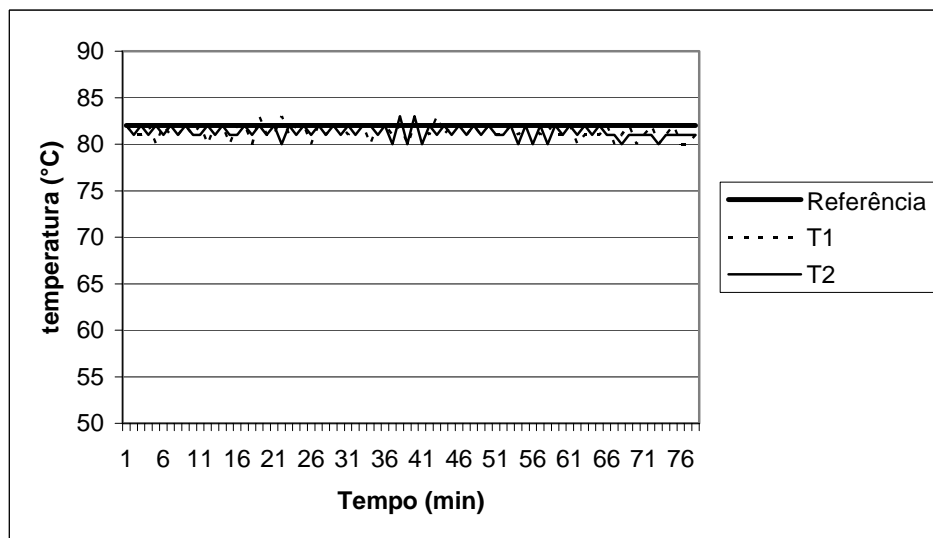


Figura 4.30. Curva de resposta em regime permanente do novo sistema de controle em malha fechada.

A redução da oscilação na variável temperatura conseguida (de mais de 20 graus para menos de 3) é importante para que a umidade de equilíbrio interna permaneça dentro de valores adequados, o que auxilia na redução do tempo de secagem e na qualidade final da madeira.

Na figura 4.31 é apresentada a resposta a uma mudança de referência do sistema de controle original. Podem-se notar basicamente três problemas: oscilação, “overshoot” e não uniformidade na distribuição de calor.

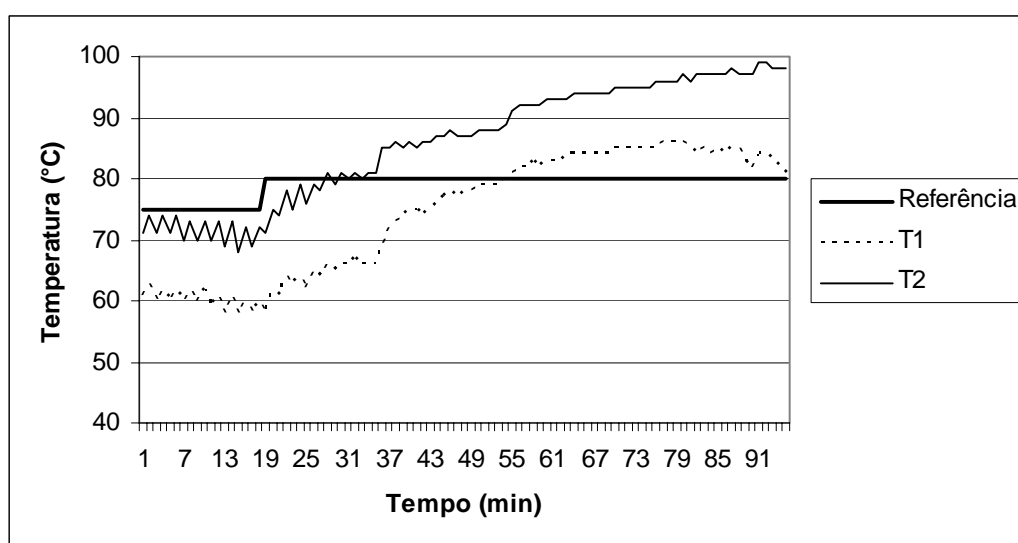


Figura 4.31. Exemplo de resposta ao degrau do sistema original de controle em malha fechada.

Na figura 4.32 tem-se a resposta ao degrau do novo sistema de controle. Observam-se melhorias quanto à resposta transitória, seguimento à referência e distribuição de calor.

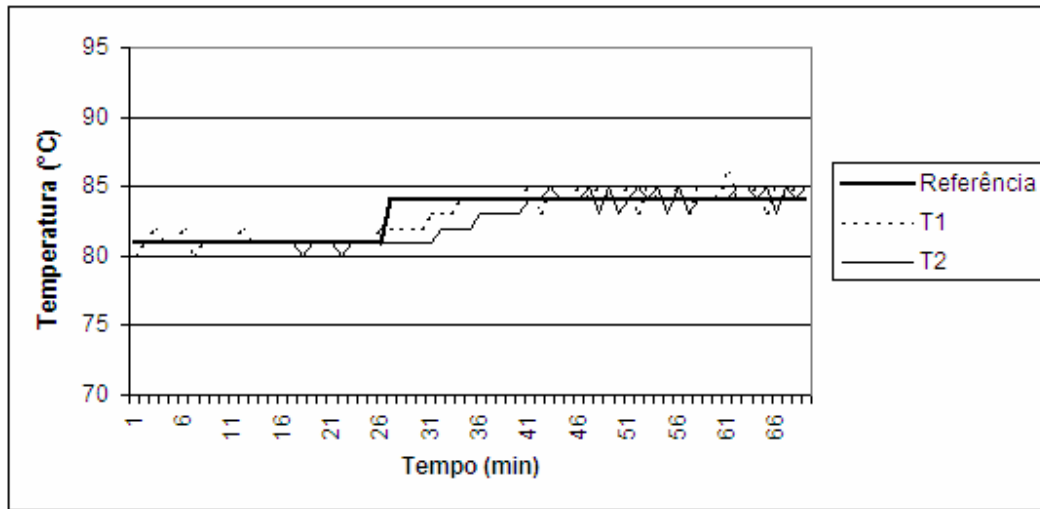


Figura 4.32. Resposta ao degrau do novo sistema de controle em malha fechada.

Com o novo controlador a resposta ao degrau em malha fechada esta muito menos oscilatória comparando com o sistema de controle original. A resposta também está mais rápida, porém não tanto como em simulação. Fato devido a saturação do sinal de controle em níveis não previstos em simulação.

Com relação à produtividade, economia de energia e redução do índice de ressecagem a tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos durante 3 meses posteriores a instalação do novo sistema de automação e controle.

Os valores abaixo foram calculados comparando-se o resultados obtidos com as modificações, uma média de 3 meses de funcionamento, com os valores médios dos últimos 3 últimos meses anteriores as inovações.

- $$red\_tempo\_secagem = \frac{Tempo\_Anterior - Tempo\_Atual}{Tempo\_Anterior} \%;$$
- $$aumento\_produtividade = \frac{\left| \frac{Volume}{Tempo\_Anterior} - \frac{Volume}{Tempo\_Atual} \right|}{\frac{Volume}{Tempo\_Anterior}} \%;$$

- $$economia\_energia = \frac{\sum Tfa \times Ef - \sum Tfp \times Ef}{\sum Tfa \times Ef};$$
  - $Tfa$  = tempo de secagem por fase de secagem antes das modificações;
  - $Tfp$  = tempo de secagem por fase de secagem depois das modificações;
  - $Ef$  = energia em KW consumida por fase de secagem.
- $$redução\_de\_ressecagem = \frac{Índice\_Anterior - Índice\_Atual}{Índice\_Anterior}$$

Redução do tempo de secagem / estufa	8 %
Aumento da produtividade mensal / estufa	8,7%
Economia de energia por ciclo de secagem	13,3%
Redução do índice de ressecagem	6%

Tabela 4.2. Resultados relacionados à produtividade e a economia de energia.

Devido aos resultados conseguidos, a empresa onde foi realizado este projeto optou por realizar este trabalho em mais sete estufas que hoje já estão em funcionamento com o novo sistema, apresentando resultados semelhantes aos mostrados neste trabalho.

## 4.7 Proposta para trabalhos futuros

Na sessão 2.5, que tratava do programa de secagem, foi mencionado que nas curvas de secagem a temperatura do ar no interior do secador (e conseqüentemente a umidade relativa) é ajustada em função do teor de umidade da madeira. Isto significa que os valores de referência para as temperaturas de bulbo seco  $Tbs$  e bulbo úmido  $Tbu$  são mantidos

constantes até que a madeira alcance uma determinada umidade. Uma forma mais eficiente de realizar esta operação seria controlando a mudança de referência de  $T_{bs}$  e  $T_{bu}$  de forma contínua, ou seja, muda-se a referência conforme a variação da umidade da madeira. Esta forma de controle poderia proporcionar maiores ganhos em termos de tempo de secagem e redução de defeitos, já que a curva de secagem poderia tornar-se mais ou menos agressiva detectando-se de forma contínua a variação de umidade.

Para que este procedimento fosse corretamente aplicado deveria se conhecer um modelo completo do processo onde todas as correlações entre as variáveis envolvidas fossem determinadas. No presente processo, os dados referentes à atuação dos dampers e do sistema aspersor não estão disponíveis para serem utilizados no mesmo sistema de controle devido a restrições no hardware instalado. Desta forma, é necessário realizar uma simplificação do modelo completo do sistema para poder propor uma estratégia de controle avançado que possa ser aplicada e melhore o comportamento hoje obtido com os controladores usados e sem modificações nos sistema de atuação e medição.

O objetivo neste caso é controlar as variáveis intermediárias  $T_{bs}$  e  $T_{bu}$  em uma malha interna e a umidade numa malha externa.

Assim deve-se buscar uma representação da correlação entre as variáveis  $T_{bs}$  e  $T_{bu}$  com a umidade da madeira. Conhecida esta representação é possível propor um controle em cascata baseado em modelo, conforme figura 4.33.



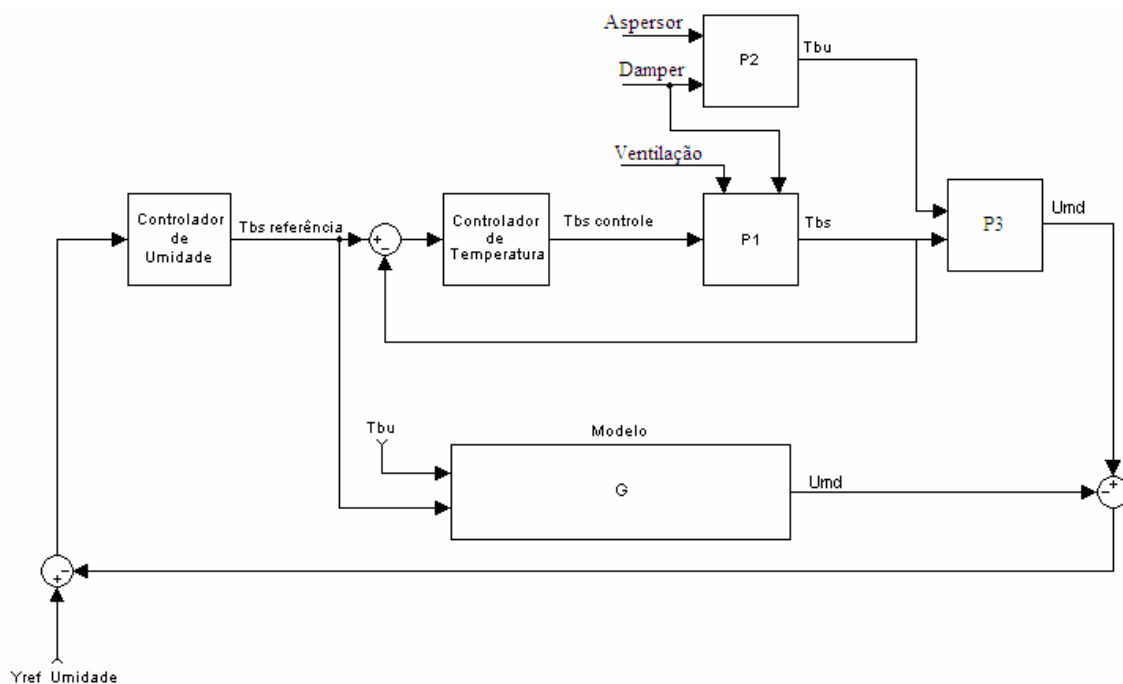


Figura 4.33. Controle em cascata baseado em modelo.

Neste diagrama o processo P1 representa a dinâmica que relaciona a temperatura de bulbo seco com a válvula de aquecimento, o sistema de ventilação e dampers sendo esta dinâmica analisada neste capítulo. A válvula de aquecimento está diretamente relacionada com o termômetro Tbs, e o controle de temperatura utilizado é o projetado neste trabalho considerando uma modelagem linear. O processo P2 representa a dinâmica do ar interno do secador, que é diretamente influenciado pelos dampers e pelo sistema aspersor e apresenta como saída a variável Tbu. O processo P3 retrata a dinâmica da umidade da madeira, e possui como entradas as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido.

O controle da variável Tbs tem uma dinâmica de malha fechada muito mais rápida que a de umidade e por tanto a estrutura cascata é adequada. Para a implementação do controle cascata pode se utilizar uma estrutura do tipo modelo interno (IMC-internal model control) como se mostra na figura 4.33. Assim a proposta deste novo sistema de controle exigiria a identificação destas dinâmicas mais lentas para posterior ajuste do controlador.

## 4.6 Conclusões do capítulo

Com as modificações realizadas no sistema de controle conseguiu-se grandes melhoras em termos de oscilação da variável temperatura e resposta ao degrau de referência. Tanto em um caso como em outro os ganhos foram significativos, obtendo-se um fator de redução maior que seis.

Com estes resultados conseguiu-se reduzir o consumo de energia, pela redução do tempo de secagem, e aumentar a produtividade do sistema. Maiores ganhos poderiam ser conseguidos caso o problema da saturação do sinal de controle fosse resolvido. Outro ganho também pode ser conseguido com a implementação de um sistema de controle como o apresentado na sessão 4.5, onde o controle contínuo da variável de saída poderia acelerar a resposta do sistema reduzindo o tempo de secagem e aumentando a produtividade.

# Capítulo 5

## Conclusões e perspectivas

No processo de secagem de madeira serrada, os sistemas de controle e instrumentação são fundamentais. Destes dependem a produtividade e a qualidade do produto final. Do ponto de vista de controle, o processo de secagem tem muito a evoluir. Na prática controladores simples e muitas vezes ineficientes são largamente utilizados. Os sistemas de medição são muitas vezes mal empregados resultando em uma secagem custosa do ponto de vista financeiro, e pouco eficiente.

O trabalho conseguiu atingir o objetivo traçado inicialmente, que era aumentar a produtividade do sistema e reduzir o consumo de energia, através de modificações nos sistemas de instrumentação e controle.

Com modificações no posicionamento a adição de novos sensores, juntamente com a implementação de um controlador puramente proporcional conseguiu-se reduzir as diferenças de temperatura encontradas dentro da câmara de secagem e as oscilações da variável controlada em torno da referência. As reduções nas diferenças de temperatura chegaram a 85%, passaram de 20°C a 3 °C, e as oscilações de temperatura em torno da referência em regime permanente tiveram também uma redução de aproximadamente 85%. Estas implementações resultaram em aumento de produtividade em torno de 9% além de uma economia de energia superior a 13%. Outro ponto a ser destacado foi a implementação do supervisão SCADA que permite aos operadores de secagem realizarem um monitoramento “on-line” do sistema, seja de forma gráfica e/ou através de dados históricos prevenindo e detectando defeitos de operação.

Assim, este trabalho teve como resultado não só uma proposta de melhoria para o sistema de atuação, medição e controle do processo de secagem, como também se constitui num ponto de partida para novas pesquisas relacionadas a uma busca por um sistema de controle mais eficiente para este processo.

Como perspectivas para o futuro próximo espera-se a implementação de sistemas de controle mais eficientes, como o controle em cascata, para que se possa cada vez mais buscar uma maior eficácia no processo e para que se reduza o desperdício no processo de secagem, tanto de energia elétrica como de madeira, insumos que estão se tornando cada vez mais custosos e racionalizados a cada dia.

# Referências bibliográficas

- ANDRADE, Ariel; 2000. *Indicação de programas de secagem convencional de madeira*. Piracicaba. 72p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo.
- ALLARD. F.; FUCHS J.: 1993 *Artificial Intelligence - The State of the Art*. ESA's Technology Programme Quartely. Vol.3. N.3. Sep.
- ARGANBRIGHTS, D.G.;1979 *Development in applied drying technology*. 1971-1977. Forest Products Journal 29(12):14-20.
- ASTRÖM, K. J. & HAGGLUND, T.; 2000 *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina.
- COELHO, A. A. R. & COELHO. L. S.; 2004 *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*. Editora da UFSC.
- DENIG, J.; 2004. *Kiln schedule development, use, and modification*. In: FOREST PRODUCTS SOCIETY. Profitable solutions for quality drying of softwoods and hardwoods. Charlotte. p. 71-75.
- KALMAN F. F. P. & CÔTE W.; 1984. *Principles of wood science and technology*. Escola Superior de Agricultura. New York Springer Verlag. São Paulo.
- ELMAN, J. L.; 1990, *Finding structure in time*. Cognitive Science, vol. 14, pp. 179-211.
- EMARUCHI, B.; JIN, Y. SAUCHYN, D.; KITE, G.; 1994. *Land Cover Mapping Using an Artificial Neural Network*. IN: ISPRS Mapping and Geographic Information Systems. Georgia. V.30. pp 84-89.
- FREEEMAN, J. A.; SKAPURA, D. M.; 1991 *Neural Network - Algorithms and Programming Techniques*. Reading. Addison Wesley Pub. Comp.
- FRICKE, K. W.; 1968 *The relation of humidity and air circulation to the drying of timber*. Melbourne, CSRIO, Div. Of For. Prod. 12p.

- GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I. P.; 1985. *Secagem racional da madeira*. São Paulo: Nobel. 111p.
- HART, C. A.; 1966. *The drying of wood*. Raleigh, North Carolina Agric. Extension Service. 24p.
- HENCHT-NIELSEN, R.; 1989. *Neurocomputing*. San Diego. Addison-Wesley. 433p.
- HILDEBRAND, R., ed.; 1970. *Kiln drying of saw timber*. Nuertingen: RHM GmbH.
- JANNLOWSKY, I. P.; 1995. *Equipamentos e processos para secagem de madeiras*. In: Seminário Internacional de utilização de madeira de eucalipto para serraria. São Paulo, 1995. Anais. São Paulo: IPEF;IPT. p.109-118.
- JANNLOWSKY, I. P.; 2000. *Melhorando a eficiência dos secadores para madeira serrada*. Piracicaba: IPEF. (Circular Técnica n.191)
- KLITZKE, R. J.; 2002 *Uso do inversor de frequência na secagem de madeira*. Curitiba. 218p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná.
- KOLLMANN, F. F. P. & CÔTÉ, W. A.; 1968. *Principles of Wood Science and Technology*. Berlin, Springer – Verlag V. I. .
- LIPPMANN, R. P.; 1987. *An Introduction to computing with neural nets*. Reprinted from IEEE-ASSP Magazine. pp 4-22.
- MARTINS, V.A.; 1988. *Secagem de madeira serrada*. Brasília: IBDF.
- MATLAB; 2002, versão 6.5. *Linguagem de computação técnica*. THE MATHWORKS, INC. Massachusetts, Junho.
- MEDEIROS, J. S.; 1999. *Bancos de Dados Geográficos e Redes Neurais Artificiais: Tecnologias de apoio à Gestão de Território*. São Paulo. Tese de Doutorado (Geografia) – USP.
- MCKEOWN, D. M.; 1987. *The Role of Artificial Intelligence in the Integration of Remotely Sensed Data with Geographic Information Systems*. IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing. Vol. GE-25, N.3. pp. 330-347.

- MCMILLEN, J. M. & WENGERT, E. M.; 1978. *Drying eastern hardwood lumber*. Madison, USDA For. Prod. Lab. 140p (Agriculture handbook, 528)
- MILLS, R.; 1991 *Australian Timber Seasoning Manual*. Australian Furniture Research and Development Institute Ltd., Launceston, Tasmania, Australia.
- PONCE, R. H. & WATAI, L. T.; 1985. *Secagem da madeira*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Brasília. 69p.
- PRATT, G.H.; 1974. *Timber drying manual*. London: Department of the Environment Building Research Establishment.
- SKAAR, C.; 1972. *Water in wood*. Syracuse. Syracuse University Press. 218p. (Syracuse Wood Science Series, 4).
- STCP-Engenharia de projetos Ltda.; 1990. *Secagem de madeiras serradas*. Curitiba. 68p.